

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra energetiky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2020

Pavel Béres

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra energetiky

Využití vodní energie na malých tocích

Hydropower Utilisation on Small Streams

Student:

Vedoucí bakalářské práce:

Pavel Béres

doc. Ing. Mojmír Vrtek, Ph.D.

Zadání bakalářské práce

Student: **Pavel Béres**
Studijní program: **B3907 Energetika**
Studijní obor: **3907R012 Energetika 21.století**
Téma: **Využití vodní energie na malých tocích
Hydropower Utilisation on Small Streams**

Jazyk vypracování: **čeština**

Zásady pro vypracování:

1. Zpracujte rešerši zabývající se historickým vývojem, současným stavem případně i perspektivami dalšího rozvoje využívání energie malých vodních toků ve vybrané lokalitě v oblasti Šumavy.
2. Zpracujte návrh malé vodní elektrárny pro vybrané hydrologické parametry. Návrh bude obsahovat analýzu výkonových parametrů, skladbu malé vodní elektrárny, energetické, ekonomické a environmentální zhodnocení.

Seznam doporučené odborné literatury:

KAMINSKÝ, J., VRTEK, M. *Obnovitelné zdroje energie*. Ostrava: VŠB – TU Ostrava, 1998. 102 s. ISBN 80-7078-445-8.
KMINIAK, P. *Vodné mikroelektrárne*. 1. vyd. Bratislava: ALFA, 1990. ISBN 80-05-00771-X.
GABRIEL, P., ČIHÁK, F., KALANDRA, P. *Malé vodní elektrárny*. Praha: ČVUT, 1998. ISBN 80-01-01812-1.
GULLIVER, J. S., ARNDT, R., E., A. *Hydropower engineering handbook*. 1. vyd. New York: McGraw-Hill, 1991. ISBN 0-07-025193-2.
VRV a.s., SWECO Hydroprojekt a.s. *Analýza efektivního využití MVE z hlediska přírodního potenciálu vodních toků jako energetického zdroje*. Programový projekt č. TB010MZIP066. Praha: Technologická agentura České republiky, 2015.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Mojmír Vrtek, Ph.D.**

Datum zadání: **20.12.2019**

Datum odevzdání: **18.05.2020**


doc. Ing. Stanislav Honus, Ph.D.
vedoucí katedry

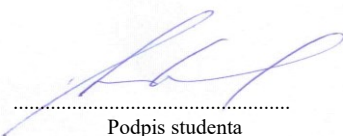



prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne 10. května 2020




.....
Podpis studenta

Prohlašuji, že:

- jsem si vědom, že na tuto moji závěrečnou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- беру на ве́домі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užít tuto závěrečnou bakalářskou práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této bakalářské práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- беру на ве́домі, že - podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů - že tato bakalářská práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce, a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 10. května 2020



Podpis autora práce

Jméno a příjmení autora práce: Pavel Béres

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

BÉRES, P. *Využití vodní energie na malých tocích: bakalářská práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra energetiky, 2020, [69] s.
Vedoucí práce: Vrtek, M.

Bakalářská práce se zabývá energetickým využitím vody k výrobě elektrické energie a návrhem malé vodní elektrárny. V první části je uveden popis hydroenergetických děl na území Šumavy a popis skladby vodního díla. V druhé části je dle zadaných hydrologických údajů proveden návrh turbíny s využitím univerzální charakteristiky. Ve třetí části je pak návrh elektrárny zhodnocen energeticky, ekonomicky a environmentálně.

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

BÉRES, P. *Hydropower Utilisation on Small Streams*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, *Bachelor Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Power Engineering, 2019, [69] p.
Thesis head: Vrtek, M.

The bachelor thesis deals with energy utilization of water for electric energy production and design of small hydro power plant. In the first part there is a description of hydroenergy works in the area of Šumava and a description of the composition of the water works. In the second part, according to the entered hydrological data, the design of the turbine is performed using the universal characteristic. In the third part, the design of the power plant is evaluated energetically, economically and environmentally.

SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK, VELIČIN A JEDNOTEK¹

Značka	Veličina	Jednotka
η	Účinnost	(%)
η_t	Účinnost turbíny	(%)
$\cos \varphi$	Účíník	-
f	Frekvence	(Hz)
H	Spád	(m)
n	Počet otáček	(ot.min ⁻¹)
Q	Průtok	(m ³ .s ⁻¹)
IN	Investiční náklady	(Kč)
MIN	Měrné investiční náklady	(Kč/kW)
PN _{dot}	Prostá návratnost se získáním dotace	(rok)
PN	Prostá návratnost bez dotačního financování	(rok)

¹ Ostatní značky, veličiny, jednotky jsou uvedeny přímo v odpovídající kapitole této práce.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

Značka	Význam
ČSN	Česká státní norma
ERÚ	Energetický regulační úřad
JČE	Jihočeská energetika a.s.
KVET	Kombinovaná výroba elektřiny a tepla
MPO	Ministerstvo průmyslu a obchodu
MVE	Malá vodní elektrárna
OP PIK	Operační program podnikání a inovace pro konkurenceschopnost
OZE	Obnovitelné zdroje energie
TE	Tepelná elektrárna
VE	Vodní elektrárna
VN	Vysoké napětí
ZČE	Západočeské energetika a.s.
ŽP	Životní prostředí

OBSAH

1	Úvod	1
2	Šumava, její historické osídlení a její energetické bohatství	2
2.1	Plavební kanály	3
2.1.1	<i>Schwarzenberský plavební kanál</i>	3
2.1.2	<i>Vchynicko – Tetovský plavební kanál</i>	4
2.1.3	<i>Inženýři Josef Rosenauer a Karel Kosek</i>	4
2.2	Některé řeky a elektrárny na Šumavě	5
2.2.1	<i>Řeka Pstružná, některá její vodní díla a MVE Čachrov</i>	5
2.2.2	<i>Elektrárna Radešov</i>	6
2.2.3	<i>Elektrárna Čeňkova Pila</i>	6
2.2.4	<i>Přečerpávací elektrárna pod Černým Jezerem</i>	7
2.2.5	<i>Řeka Vydra a MVE Vydra</i>	10
2.3	Shrnutí čtyř významných šumavských elektráren	13
3	Perspektivy dalšího rozvoje malých vodních děl v oblasti Šumavy	14
4	Dělení vodních elektráren	15
4.1	Koncepce řešení vodní energie toku	15
4.2	Velikost spádu	15
4.3	Způsob provozu elektrárny	17
4.4	Konstrukce budov	17
4.5	Instalovaný výkon dle normy ČSN 75 0128	18
5	Skladba malé vodní elektrárny	18
5.1	Stavební konstrukce	18
5.1.1	<i>Vtokové objekty, usazovací nádrže</i>	19
5.1.2	<i>Přiváděcí a odpadní derivační vedení vody</i>	20
5.1.3	<i>Vyrovnávací komory</i>	21
5.1.4	<i>Budovy vodních elektráren</i>	22
5.2	Strojní zařízení	23
5.2.1	<i>Základní parametry turbín</i>	25
5.2.2	<i>Kaplanova turbína</i>	26
5.3	Převody	28
5.4	Elektrotechnická zařízení MVE	28
5.4.1	<i>Hydroalternátory</i>	29
5.4.2	<i>Transformátory</i>	30

5.4.3	<i>Rozvaděče</i>	30
5.4.4	<i>Vlastní spotřeba</i>	30
5.4.5	<i>Rozvodny</i>	30
5.4.6	<i>Ovládání a řízení elektrárny</i>	31
6	Návrh MVE – praktická část práce	31
6.1	Hydrologické parametry pro návrh MVE	31
6.2	Výpočty pro Kaplanovu turbínu	34
6.3	Odhadovaná výroba elektrické energie z navrhované turbíny	39
6.4	Vlastní spotřeba MVE	41
6.5	Celková vyrobená elektrická energie	41
7	Ekonomické zhodnocení návrhu MVE	42
7.1	Dotace	42
7.2	Provozní podpora – výkupní ceny, zelené bonusy	42
7.3	Měrné investiční náklady	45
7.4	Výpočet dotace	47
7.5	Výpočet provozní podpory – výkupní ceny	48
7.6	Návratnost navrhované MVE	49
7.6.1	<i>Návratnost v případě získání dotace</i>	49
7.6.2	<i>Návratnost bez dotačního financování</i>	49
8	Environmentální zhodnocení návrhu MVE	50
8.1	Ekologie, energetika, ekonomika	50
8.2	Porovnání úspory emisí MVE s emisními faktory pro elektřinu v ČR	51
9	Závěr	51
	Použitá literatura	54
	Seznam použitých obrázků	57
	Seznam použitých diagramů	57
	Seznam použitých grafů	58
	Seznam použitých tabulek	58
	Seznam příloh	58
	Příloha 1 - Fotografie, mapy, schémata k rešeršní části práce	59
	Příloha 2 - Výpočet IRR – vnitřního výnosového procenta	69

1 Úvod

Již ve starém Egyptě, Mezopotámii, Indii, Číně, Římě lidé poznali, že vodní energie značně usnadňuje fyzickou práci. Dokázali vodním kolem zvedat vodu do zavlažovacích kanálů, poháněli jím vodní mlýny na obilí, později jím poháněli kovářské hamry, používali je na pilách, dále pak k čerpání vody. Vlivem technického poznání v oblastech matematiky a mechaniky v 18. století došlo k formulaci teorie turbín matematikem a fyzikem Leonhardem Eulerem (15.4.1707 – 18.9.1783) v jeho třech spisech (zveřejněných v letech 1750, 1751, 1754). Z těchto spisů vyšli v návrzích svých turbín další vynálezci a počátkem 20. století dochází k prvním realizacím vodních turbín na vodních elektrárnách.

V současné době máme tři nejpoužívanější turbíny, které vzešly z tohoto raného vývoje. A to turbínu Francisovu (1847), Peltonovu (1880) a Kaplanovu (1918).

Na území dnes již bývalého Československa, lze najít zmínky o využívání vody k usnadnění fyzické práce již od roku 718 n.l., kdy byl vybudován první mlýn ve střední Evropě na řece Ohři u Žatce. V roce 993 pak byly vybudovány mlýny Břevnovského kláštera na Vltavě pod Pražským hradem. Od 14. století jsou známy vodní díla též na Šumavě.

Před 1. světovou válkou dochází k rychlému rozvoji soukromých malých vodních elektráren, které zásobovaly blízké továrny, blízké obce a městečka. Mezi 1. a 2. světovou válkou dochází k výraznému prohlubování technických odborností v oblasti hydroenergetických děl a dochází k rychlé výstavbě větších vodních elektráren včetně 1. přečerpávací pod Černým jezerem na Šumavě. Po konci 2. světové války dochází k dalšímu většímu rozvoji a do roku 1965 je vybudováno velké množství hydroenergetických děl. Příkladem jsou díla na Vltavě, Svatce, Váhu, Dunaji. S nastupující jadernou energetikou pak dochází k vybudování velkých přečerpávacích vodních děl.

Tuto bakalářskou práci chci pojmut v první části jako uvedení zajímavých hydro-technických děl dnešního území Národního parku Šumavy, v druhé části uvedení některých technických součástí staveb malých vodních elektráren (MVE) včetně strojního a elektrotechnického vybavení.

V třetí části této práce se budu věnovat návrhu MVE a to prostřednictvím univerzální charakteristiky jedné z turbín, která mi po dalším studiu odborné literatury logicky vyplyne k zadaným hydrologickým parametrům. V této části práce rovněž uvedu vyhodnocení ekonomiky tohoto návrhu MVE a zmínění environmentálního pohledu na porovnání MVE a globálních emisí v ČR při výrobě elektrické energie.

V odstavci o ekologii pak položím některé osobní názory na potřebu uspokojení potřeb energetických, ekologických a ekonomických.

2 Šumava, její historické osídlení a její energetické bohatství

Použité zdroje [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8]

Rozlehlé území Šumavy tvoří v současnosti hranici mezi Českou republikou, Německem a Rakouskem. Tímto z nejstarších pohoří v Evropě, prochází rozvodí mezi Černým a Severním mořem. Z české strany se jeví celé pohoří velmi pozvolně a výstupy na jeho vrcholy jsou relativně mírné oproti německé straně hranice, kde sestupují o dost příkřeji. Měkký a relativně málo ostrý terén vyjma vrcholů, které byly vymodelovány ledovci, je i přes velmi častou nadmořskou výšku nad 1000 m n.m. relativně dobře přístupný pro původní české obyvatelstvo – české osadníky.

Tito zvláště svobodní sedláci – králováci, měli povinnost střežit pohraniční území a byly jim udělovány různá privilegia. Tito sedláci měli pak své nadřízené ve formě rychtářů, kteří byli voleni a měli vrchnostenská práva. Území Šumavy, které rychtáři spravovali obsahovalo celkem 8 rychet, kde však převažovalo německé vedení. Byly to rychty: Hamry, Hojsova Stráž, Javorná, Kochánov, Stodůlky, Svatá Kateřina a Zhůří. České vedení se udrželo na rychtě Stachy, které si udrželo svá práva i přes pronásledování v období po bitvě na Bílé hoře (1620).

Později však s příchodem německých kolonistů z Bavorska došlo k postupné převaze německého obyvatelstva i díky rozvoji těžby drahých kovů v hornických městečkách (Rejstejn a Kašperské Hory). Dochází i k rozvoji sklářství vzhledem k dostatku křemene a dřeva.

Rozsáhlé lesy zprvu bránily osadníkům osídlovat půdu, nicméně později se stalo dřevo vyhledávaným materiálem a jeho prodejem na trzích se celá oblast Šumavy stávala ekonomicky silnější. Dřevo se po vykácení splavovalo do údolí a na vzdálené trhy – velmi často pak do Prahy a do Vídně. Aby mohlo dojít k prodejm na vzdálených trzích, kde byla po dřevě velká poptávka, začal rod Schwarzenbergů jako největších majitelů lesního bohatství, budovat plavební kanály, které umožňovaly velmi levně dopravit potřebné množství dřeva do řek a po nich pak dále na zmíněné trhy.

Velmi důležitou roli však v rámci Šumavy hrála i těžba kovů, zejména zlata, stříbra a železné rudy, kdy již od 14. století jsou doloženy hamry (kovářské dílny), které byly poháněny vodními toky.

Po polovině 19. století začal význam těžby dřeva klesat. Na lehce dostupných pláních byly lesy z velké části vytěženy a začaly sít hlasy odborníků o zničené krajině. Majitelé lesních pozemků začali s obnovou porostů. Postupný a stále se zrychlující útlum těžby tak připravil velké množství rodin o finanční příjmy.

2.1 Plavební kanály

Na Šumavě byly vybudovány dva plavební kanály pro dopravu dřeva z tamějších rozsáhlých lesních pozemků. Historicky prvním plavebním kanálem je Schwarzenberský kanál. Druhým plavebním kanálem je kanál Vchynicko – Tetovský.

2.1.1 Schwarzenberský plavební kanál

Spojení povodí Moravy a Dunaje (obrázek 1) – viz příloha, je myšlenkou již z doby krále Karla IV, který prostřednictvím svých odborníků chtěl prověřit tuto možnost. Ovšem v tehdejší době vlivem nemožnosti překonání hlavního šumavského hřebene, který stojí v cestě, bylo od tohoto záměru upuštěno.

Až schwarzenberský lesní inženýr Josef Rosenauer (1735 – 1804) navrhl celý plavební kanál napájený přítoky Vltavy. Tato velmi stará idea byla v tehdejší době ještě více podporována vzhledem k potřebě dopravit dřevo do Vídně, kde byla velká poptávka. Josef Rosenauer v roce 1755 zjistil, že propojení obou povodí je možné a zpracovaný návrh předložil roku 1775 knížeti Schwarzenbergovi ke schválení.

Kníže jej schválil až po prokázání reálnosti tohoto plánu a to v roce 1777. Původní délka kanálu byla 45 km a se stavbou se začalo 29. dubna 1789 od potoka Zwettelbach, kde kanál pokračoval severozápadním směrem k Jelení hoře, pod kterou kanál prochází dlouhým tunelem (419 metrů) do Nového Údolí. Bylo však nutné upravit napájecí potoky a tímto se délka celého průplavu zvýšila na 89,7 km. Její trasa se skládala z úseků: Světlý potok – tunel pod Jelení horou s (12 km) skluzem k potoku Zwettelbach (31,6 km).

V Rakousku pak úsek k řece Mhl (7,6 km) a konečný úsek k Dunaji u Neuhausenu (38,5 km). Plavba tímto plavebním kanálem začala v roce 1824.

Tunel pod Jelení horou (obrázek 2) – viz příloha, je mimořádnou technickou památkou. Celý tunel je vydlážděn, obsahuje 2 větrací šachty, jeho výška je 253 cm a šířka pak 270 cm. Jeho spád je 16 ‰, plavební rychlost 1 m/s a průtokové množství vody 1,8 m³/s. Poslední zaznamenané plavení dřeva v celém úseku plavebního kanálu bylo v roce 1916.

2.1.2 Vchynicko – Tetovský plavební kanál

Druhým plavebním kanálem je kanál Vchynicko – Tetovský (obrázek 3) – viz příloha, který vznikl jako potřeba plavit dřevo do Prahy. I tato myšlenka je starého data a v první zprávy se datují do 16. století. Vzhledem k nevýdělečnému prodeji dřeva v blízkém okolí a to hlavně tamějším sklárnám, přišel komisař prácheňského kraje Bayerweck spolu s ředitelem prášilského panství Václavem Radnickým v roce 1795, s plánem splavnění oblasti řek horního toku Otavy včetně jejich přítoků českému guberniu, které mělo celý návrh posoudit.

Přes výhodnost prodeje dřeva v Praze nebyl projekt uskutečněn z důvodu nedostatku kapitálu. Po prodeji prášilského panství knížeti Josefu Schwarzenbergovi navrhl Josef Rosenauer podrobný plán a tento předložil dne 1. března 1799. Již dne 6. března 1799 bylo rozhodnuto a plán se začal realizovat a na jaře roku 1801 se začalo dopravovat dřevo ze šumavských lesů do Prahy. Celková délka kanálu byla podle hlášení Josefa Rosenauera 17.843 m. Spolu s tím bylo vyčištěno 38.283 m říčního toku Otavy od kamenů a bylo vybudováno 13 jezů.

I zde však od poloviny 19. století začalo množství plaveného dřeva postupně klesat vlivem snížení poptávky na pražském trhu, který byl stále více zásoben kamenným uhlím z blízkého buštěhradsko – kladenského revíru.

2.1.3 Inženýři Josef Rosenauer a Karel Kosek

Šumava, tak jak ji dnes známe, byla poznamenána technickými díly, které navrhlo a realizovalo mnoho velmi schopných techniků. Mezi nimi však mají významné místo dva čeští inženýři a to: Josef Rosenauer a Karel Kosek (obrázek 12) – viz příloha. V této práci se o nich často zmiňuji, tak je musím i více představit.

Josef Rosenauer se narodil 25. února 1735 ve Chvalšínách. Ve 13 letech nastoupil do učení u lesníka Petra Lambachera. Již ve svých 24 letech v roce 1759 nastoupil do schwarzenberského lesního úřadu v Českém Krumlově. Pro své schopnosti jej kníže Schwarzenberg na své útraty poslal studovat do Vídně inženýrská studia. Po návratu je Josef Rosenauer v roce 1771 jmenován lesním inženýrem v knížecích lesích a po 20 letech se stává ředitelem celé vodní dopravy v jižních Čechách. Nejprve pracoval na odvodnění panství Třeboňského a Hlubockého. Kromě vypracovaných několika návrhů na dopravu dříví, proslul hlavně vyřešením splavnění dříví do Vídně a do Prahy. Josef Rosenauer zemřel 10. března 1804, ve svých 69 letech.

Karel Kosek se narodil 8. listopadu 1882 v Podmoklicích. Vystudoval Vysokou technickou školu. Jeho znalosti němčiny, francouzštiny a ruštiny mu pak otevíraly možnost studovat významné světové stavby vodních děl. Po přestěhování do Prahy byl zaměstnán v Zemském úřadě. Po skončení vojenské služby v 1. světové válce se stal vrchním technickým radou na Zemském úřadě v Praze. Jeho úkolem bylo zjišťování využitelnosti vodní energie na vodních dílech. Šumava byla jeho oblíbenou oblastí a právě zde studoval využití hydroenergetického potenciálu Černého jezera a rovněž využití vodních děl na řekách Vydra a Křemelná. Ing. Karel Kosek byl v roce 1937 pověřen zemským prezidentem, aby vedl stavbu elektrárny Vydra. Karel Kosek zemřel 15. listopadu 1960 ve svých 78 letech.

2.2 Některé řeky a elektrárny na Šumavě

V této kapitole chci uvést některé zajímavé řeky a s nimi související energetická využití ať už přímo na vodní elektrárny nebo další vodní díla důležitá pro historický vývoj života na Šumavě.

2.2.1 Řeka Ostružná, některá její vodní díla a MVE Čachrov

Řeka Ostružná pramení pod vrchem Jedlová (1175 m.n.m.) a na jejím přítoku u Lipplova Dvora (malá osada u bývalé Lipplovky pily) jsou patrné části malé elektrárny, která sloužila v osvětlení objektu a částečně k lehké temperaci skleníků. Její výkon byl velmi malý. Další malé vodní dílo se nacházelo u Gerlova Dvora, kde stával starý hamr s malou elektrárnou – hamr i elektrárna byly poháněny z malé vodní nádrže nad bývalým zámčkem. Dále po toku Ostružné byla pila Jeseník s velkým vodním kolem s průtokem 0,18 m³/s a spádem 4 m.

Malá vodní elektrárna Čachrov je nejstarší známou družstevní elektrárnou a to dokonce i v tehdejším Rakousku – Uhersku. Datuje se do roku 1902, kdy po vyhoření tehdejší budovy mlýna začala stavba elektrárenské budovy, která byla 16. listopadu 1902 postavena a vysvěcena. Bylo ustanoveno družstvo, kterému elektrárna patřila. Tehdejší strojní zařízení dodala plzeňská firma B. Říha a elektrické vybavení dodala firma František Křižík. Z této elektrárny bylo zásobováno elektrickou energií 180 žárovek a 4 obloukové lampy. Zajímavostí bylo, že každý podílník této stavby platil paušál 20 korun za každou žárovku a rok. Později byla tato elektrárna osazena turbínou německého výrobce Brigleb a Hansen – Gotha, která zvýšila výkon a tak elektrárna vyjma několika malých motorů poháněla i mlátičku obilí.

V roce 1937 proběhla modernizace a byla zde osazena Francisova turbína, která zvýšila výkon na 22 kW. Tím se obec Čachrov zapsala do dějin jako obec, která byla jako jedna z mála v noci osvětlena elektrickým proudem. Postupem času, zvláště po připojení Čachrova na síť západočeské energetiky elektrárna chátrala. V roce 1992 došlo k její rekonstrukci a původní Francisova turbína byla nahrazena Bánkiho turbínou.

Na toku řeky však stála řada hamrů a mlýnů. Vyjma těchto, zde byly postaveny i vodní díla s vodními koly a instalovaným výkonem 20,5 kW.

V oblasti obce Kolinec pak bylo 9 vodní děl s 5 vodními koly a 4 turbínami s instalovaným výkonem 109 kW, a v okolí Sušice pak bylo 11 vodních děl se 4 vodními koly a 13 turbínami s instalovaným výkonem 125,9 kW. Na přítocích řeky Ostružné pak stálo 7 vodních děl se 7 vodními koly a instalovaným výkonem 17,49 kW. Tímto množstvím vodních děl byla řeka Ostružná energeticky nejvyužívanějším vodním tokem střední Šumavy.

2.2.2 Elektrárna Radešov

Vzhledem k neustálému nárůstu spotřeby elektrického proudu v Kašperských Horách, které byly v té době větším centrem, byl hledán další zdroj. Bylo proto zakoupeno v roce 1926 vodní dílo v Radešově na řece Otavě. V podstatě ihned se začal stavět náhon o délce 283 m a odpadní kanál o délce 145 m. V roce 1927 již elektrárna napájela 12 obcí. Tehdejší vedení napětí dosahovalo délky 23 km. Vedle napětí 3 kV byl použit rozvod 10 kV.

V roce 1930 došlo k osazení Kaplanovou vertikální turbínou. Tato turbína byla zkonstruována pro hltnost 3,3 m³/s, spád 4,5 m a výkon 154 kW. Převod pak 333/1000 ot./min. Generátor prostřednictvím vedení 3 kV dodával elektrickou energii do Kašperských Hor, kam dodával ještě i generátor z elektrárny Čeňkova Pila.

V roce 1952 došlo k napojení Kašperských Hor na veřejnou síť a místo původního generátoru byl instalován trojfázový synchronní generátor Škoda 200 kVA, s výkonem 140 kW, účinník $\cos \varphi$ 0,7, 1.000 ot./min., proud 288 A s budičem 47 V. Tento generátor dodával energii do sítě vysokého napětí (dále jen „VN“) 22 kV. Jeho průměrná roční výroba byla 800 MWh.

2.2.3 Elektrárna Čeňkova Pila

Od soutoku řek Vydra a Křemelná se plavilo dřevo do Dlouhé Vsi, odkud pak putovalo svazované do vorů dále po proudu do Prahy nebo se také zpracovávalo na pilách po proudu. Na tomto soutoku obou řek postavil v roce 1856 pražský podnikatel se dřevem Čeněk Bubeníček (1807 – 1888) vodní pilu (obrázek 13) – viz příloha, se skladem dřeva

z původního mlýna, který je v pramenech doložen již od roku 1717. V roce 1908 prošla pila modernizací, čímž zde byly instalovány 3 vodní kola. Dvě poháněly dva katry a třetí pak pohánělo dřevoobráběcí stroje. Cely objekt po smrti Čeňka Bubeníčka prodali dědicové městu Kašperské Hory, které požádalo hejtmanství o zřízení elektrárny. Toto povolení bylo uděleno 6. listopadu 1912.

Město Kašperské Hory nechalo přebudovat pilu na elektrárnu a nechalo zde osadit synchronní generátor 120 kVA, o výkonu 96 kW, s účínkem $\cos \varphi$ 0,8, 325 ot./min., proudem 21,5 A, o napětí 3.200 V (obrázek 9 a 10) – viz příloha. Generátor byl doplněn budičem 3,6 kW, 110 V a 32 A. Ze strojní části zde byla osazena Francisova horizontální turbína s hltností 1,4 m³/s a spádem 10 m. Původní náhon, který je částečně vyzděný kamennými kvádry byl v délce 105 m doplněn dřevěnými vantroky (obrázek 11) – viz příloha. Čeňkova Pila měla roční výrobu 500 MWh a je roku 1995 prohlášena za národní technickou památku.

Tato elektrárna zásobovala spolu s elektrárnou Radešov město Kašperské Hory prostřednictvím 3 kV vedení. I zde po napojení města na veřejnou síť 22 kV bylo původní vedení zrušeno. V současné době již od roku 1961, kdy bylo v elektrárně instalováno automatické řízení, vede podzemní vedení o napětí 3 kV do blízké elektrárny Vydra, odkud se také Čeňkova Pila řídí.

2.2.4 Přečerpávací elektrárna pod Černým Jezerem

Černé jezero spolu s Čertovým jezerem jsou největší šumavská jezera ledovcového původu. Černé jezero je zároveň největším a nejhlubším jezerem v ČR, leží v 1.008 m.n.m., jeho rozloha je 18,43 ha, největší hloubka cca 41 m, plocha jeho povodí má rozlohu 13,18 km² a denní přítok má obsah 2.600 m³ vody. V roce 1933 zde byla vyhlášena přírodní rezervace se svojí rozlohou přes 50 ha. Ač se jezero jmenuje Černé, tak má nejsvětlejší vodu ze všech jezer Šumavy. Přebytek vody pak odvádí Černý potok do řeky Úhlavy.

Černé jezero však kromě turistického zájmu lákalo i svým hydroenergetickým potenciálem a již ve dvacátých letech byla zpracována řada energetických studií na využití tohoto potenciálu. Nejzajímavější však byla práce Ing Karla Koseka, který vypracoval návrh na stavbu přečerpávací elektrárny. Tato elektrárna by byla i vůbec první svého druhu v tehdejší Československu.

Tento návrh převzaly Západočeské elektrárny a.s. v Plzni (dále jen „ZČE“), protože potřebovaly zdroj pro dodávku elektrické energie na jihu své distribuční oblasti. Zejména i proto, jelikož zde v jižní části byly některé významné střediska spotřeby el. proudu jako byla

města Klatovy, Nýrsko Železná Ruda. Zároveň by tím vyřešili potřebu krytí špičkových odběrů ve své elektrické síti hlavně v podzimním období, kdy se strojně mlátilo obilí. Proto v roce 1928 ZČE rozhodly o výstavbě elektrárny pod Černým jezerem.

Po schválení tohoto návrhu Ing. Karla Koseka byl vyprojektováním stavební části celého projektu výstavby pověřen Ing. František Alexej Pech. Škodovy závody v Plzni byly pověřeny projektováním strojní a elektrotechnické části celého projektu a staly se zároveň dodavatelem kompletního strojního a elektrotechnického vybavení. Investorem zůstaly ZČE. Již v červnu bylo zaměřeno území, kde se Ing. Pech podrobně seznámil s místními podmínkami a podle nich navrhl nejúspornější variantu vedení potrubí z Černého jezera k vyrovnávací věži a následně z vyrovnávací věže k elektrárně tak, aby se minimalizovala potřeba kácení lesního porostu.

V květnu roku 1929 se začalo se stavební částí projektu a v zájmu urychlení výstavby se pracovalo kontinuálně na celém rozsahu staveniště. V červnu roku 1930 začala montáž strojního a elektrotechnického vybavení. Již v listopadu roku 1930 se začalo se zkušebním provozem a 9. prosince 1930 začal plný provoz celé elektrárny.

Technicky je dílo rozděleno na vtokové potrubí, vyrovnávací věž, tlačné potrubí, elektrárna a vyrovnávací nádrž (obrázek 4) – viz příloha.

Vtokové potrubí z jezera k vyrovnávací věži je litinové o průměru 800 mm, celkové délce 1.266 m. Jednotlivé roury jsou utěsněny konopím a olovem. Potrubí je uloženo 1,5 m pod zemí z důvodu zamezení zámrazu vody, protože se počítá s delším setrváváním vody v klidném stavu vlivem provozních potřeb. Každá roura z důvodu skalnatého podloží uložena na 2 betonových nosnících a podsypána jemnější zeminou. Ve dvou nejhlubších místech celého vedení jsou provedeny odkalovací komory pro zadržení jemného písku (tzv. bahníky). Po 100 metrových úsecích jsou provedeny vstupy do tohoto potrubí pro případné opravy těsnosti. V místech bahníků je provedeno připojení potrubí o průměru 250 mm, kterým se plánovalo připojení několika dílčích pramenů vody. Na kótě 1010 m.n.m. bylo několik pramenů i zachyceno a vyvedeno přímo do vyrovnávací věže.

Vyrovňovací věž je železo – betonová věž vysoká 12 m o světlém průměru 4 m. Stavba je navržena cca 30 m nad turistickou cestou a je založena na 5 m hluboko pod okolním terénem. Z velké části celé výšky je zasypána zeminou kvůli možnému zámrazu hladiny vody, která se v rizikovém čase – v nočních hodinách, při čerpání, téměř nepohybuje. V původním projektu měla být komora celá zasypána až nad svůj strop. V současné době je komora zasypána o 4 m níže než je strop komory. V komoře je umístěno na dně vypouštění (tlačné) potrubí vedoucí na elektrárnu a o 1 m výše pak přívodní potrubí. Vypouštěcí (tlačné) potrubí je vybaveno samočinnou klapkou, která do 4 sekund uzavře

potrubí při příliš rychlém průtoku. Pod klapkou je pak vyvedeno potrubí pro nasávání vzduchu při klesání hladiny v tlačném potrubí. Při uzavření klapky na tlačném potrubí dojde ke zvýšení hladiny ve věži na úroveň 1008 m.n.m., kde se hladina zastaví, protože dojde k vyrovnání na úroveň hladiny Černého jezera. Z vyrovnávací věže je v projektu Ing. Pecha vyvedeno i přelivné potrubí a to v nejvyšší možné výšce hladiny – tedy nad hladinou Černého jezera. Toto potrubí ale nakonec nebylo nutné kvůli celkové výšce vyrovnávací věže dosahující cca 1013 m.n.m., což je 5 m nad hladinou jezera.

Tlačné potrubí (obrázek 5) – viz příloha z vyrovnávací věže k elektrárně je provedeno z ocelových rour o průměru 600 mm v horní části a průměru 560 mm ve spodní části trasy. Celková délka tohoto potrubí je 1.007 m. Každá roura má délku 6 m, jsou uloženy každá na 2 betonových nosnících, rovněž 1,5 m pod povrchem (v některých místech je proveden násyp nad okolní terén). Celkem je použito 178 rour, které jsou utěsněny silnými gumovými provazci umístěnými do rýh mezi přírubami. Roury jsou k sobě připojeny šrouby. Dilatace byla uvažována po 100 m, ale nakonec vlivem stálé teploty pod povrchem terénu je jeho roztažnost malá. V místech ohybů jsou umístěny betonové bloky, které jsou zpevněním celého potrubí. Vlivem změn tlaku vody v celém spádu jsou stěny ocelového potrubí postupně zesilovány z 1 mm až na 15 mm síly stěny. Proti rezivění a chemickému vlivu kyselých složek vody na potrubí je potrubí opatřeno asfaltovým nátěrem v jedné vrstvě z vnitřní strany a ve dvou vrstvách z venkovní strany. Dole u elektrárny je proveden ohyb v úhlu 90 stupňů a následně délkou 10 m je potrubí přivedeno do elektrárny. Toto provedení chrání elektrárnu před případnou poruchou na tlačném potrubí a voda vytékající z něj pak míří přímo do vyrovnávací nádrže aniž by poškodila zařízení elektrárny.

Elektrárna je umístěna na jezu vyrovnávací nádrže, aby byla chráněna před případnou povodní z řeky Úhlavy. V elektrárně je umístěna Peltonova turbína konstruována na průtok 800 l/s, spád 247,7 m a otáčky 750 ot./min. S turbínou je na společné ose umístěn generátor i šesti stupňové odstředivé čerpadlo. Čerpadlo je konstruováno na průtok 400 l/s a výtlačnou výšku 284 m při otáčkách 750 ot./min. Sací výška je pak konstruována na hodnotu 4,7 m.

V projektu se uvažovalo i o Francisové turbíně, která byla nakonec odmítnuta z důvodu, že její výkon není dostatečný při různých průtocích. Peltonova turbína elektrárny je vybavena z bezpečnostních důvodů dvojitou regulací. Regulace jehlou a regulace odklápečem proudu. Ovládání regulace je hydraulické. Mimo to má turbína ještě i pojišťovací regulaci, která je zálohou při selhání rychlostní regulace. Regulace je nutná pro ustálení rychlosti otáček na celém soustrojí. Kritickou hodnotou je zde překročení o 12 %.

Generátor je synchronní stroj, v generátorovém provozu o výkonu 1,5 MW při napětí 6 kV, $\cos \varphi$ 0,6. Napětí 6 kV je transformováno na hladinu napětí 22 kV a distribuováno do

distribuční síť. Generátor v motorovém provozu pro činnost čerpadla pak odebírá ze sítě 1,75 MW.

Vyrovňovací nádrž má objem 23.000 m³, vznikla postavením hráze přes údolí reky Úhlavy. Její hladina může poklesnout o max 2 m při práci elektrárny. Při tomto možném poklesu (aby bylo docílena maximální sací výška 4,7 m) je užitečná zadržovací schopnost vyrovňovací nádrže cca 15.000 m³. Voda z nádrže vytéká výpustným potrubím o průměru 200 mm a přepad je počítán na výtok vody do řeky Úhlavy o max. objemu 80 m³/s. Jez přepadu je zhotoven s volným přepadem dlouhým 19 m a vysokým 1,5 m. Dle měření hydrografického oddělení Zemského úřadu bylo stanoveno, že normální průtok řeky Úhlavy je 0,24 m³/s, při 50-ti leté vodě pak 40 m³/s. Přepadová kapacita 80 m³/s je tedy dostatečně naddimenzována pro případné velké vody.

2.2.5 Řeka Vydra a MVE Vydra

Malá vodní elektrárna Vydra (obrázek 6) – viz příloha má pojmenování od řeky Vydry, na které stojí. Řeka Vydra je ve výšce 980 m.n.m. u obce Modrava tvořena soutokem Javořího, Mlýnského, Roklanského, Filipenského a Modravského potoka. V nadmořské výšce 940 m nad Antýglem (již bývalý královácký sedlácký dvůr, první zmínky roku 1500) řeka Vydra teče Vchynicko – Tetovským kanálem s dalšími přítoky potoků. Řeka Vydra má celkovou délku 21,2 km s relativně vyšším průtokem na úrovni 4,12 m³/s a rozloha jejího povodí je cca 146 km². V oblasti řeky Vydry (tedy na jejích přítocích) bylo ve 30. letech 20. století v činnosti 12 vodních děl s celkovým výkonem 32,88 kW.

Ing. Karel Kosek byl zaujatý hydroenergetickým potenciálem nejen řeky Vydry, ale i řeky Křemelné, které se u Čenkovy Pily slévají a vytváří tak řeku Otavu. Připravil i 2 projekty (publikované 3. července 1923) na stavby přehrad na řece Vydře nad Antýglem a přehrady na řece Křemelné. U obou pak vybudování elektráren u Čenkovy Pily. Oba projekty se nakonec neujaly přes jejich překážky zejména problémy s výkupy pozemků a finanční náročností projektů. Jejich, v té době, největší překážkou (z dnešní doby by to již byla výhoda) byla jejich velká výroba s předpokladem 43.500 MWh/rok, jelikož elektrárny se nacházely na distribučním území Jihočeských elektráren (dále jen „JČE“), které neměly o odběr el. energie valný zájem.

Tyto 2 projekty však v roce 1950 ještě jednou přišly k pozornosti obsáhlou studií Zemského národního výboru. Tato studie jednak zpřesnila staré návrhy a také se zabývala dalšími lokalitami – příkladem přehrada na Otavě. Situace 50 – tých let však nakonec těmto

projektům definitivně nepřála. Došlo tak k obrácení pozornosti na levý břeh řeky Vydry s tím, že se nevyloučilo se k těmto projektům v budoucnu vrátit.

Koncem roku 1923 Ing. Kosek vypracoval ještě 2 energetické alternativy pro Vchynsko – Tetovský kanál. Ujala se druhá, která předpokládala využití 9,5 km kanálu od Antýglu po Mechov, odkud by kanál sloužil už jen pro odvod přebytečného množství vody do řeky Křemelné. Právě na Mechově byl vyprojektován vtokový objekt, ze kterého potrubním vedením by putovala voda do akumulární nádrže u osady Sedlo (obrázek 7) – viz příloha. Z nádrže pak potrubím do vodního zámku a odtud tlačným potrubím do MVE Vydra postavená na levém břehu řeky Vydry. Vzhledem k tehdejšímu nezájmu JČE o odběr el. energie a oproti tomu velkému zájmu ZČE o dodávky el. energie byla dohodou obou energetických společností ustanoveno, že vedení do ZČE bude po linkách 60 kV a do JČE po linkách 22 kV. Investorem měl být Zemský úřad v Praze.

Tato druhá alternativa předpokládala soustrojí elektrárny v různých verzích (1 x 3.200 kW, 2 x 3.200 kW, 1 x 4.800 kW, bez a s vybudováním akumulární nádrže). Po jednání vedení ZČE bylo rozhodnuto o rychlém postavení hydroelektrárny o výkonu 2 x 3.200 kW s vybudováním akumulární nádrže.

Při přípravě projektu bylo dost problémů. Jedny z větších byly jednání s majiteli půdy, majiteli vodních práv pily a mlýna, které se nacházely v plánované cestě vody k elektrárně a také rybářská práva. Dalšími problémy bylo promrzání vodního toku, ztráta vody netěsnostmi břehů, ztráta vody zavlažováním polností, zabezpečení proti sesuvu půdy u akumulární nádrže.

V přípravě byly také způsoby přívodu vody a projektování typů potrubí a vedení vody v dílčích úsecích. Bylo projektováno železobetonové potrubí systém Vianini, na části trasy pak zakrytý horizontální zděný kanál, část trasy dřevěné modřínové potrubí. Projektováno bylo rovněž telefonní a elektrické spojení se všemi důležitými objekty celého systému. Vznikla i skupina odborníků, kteří se podíleli na odstraňování jednotlivých problémů.

Rozhodující jednání proběhlo ve dnech 31. května až 1. června 1935 za účasti zástupců jednotlivých dotčených organizací. Provedením prohlídky území byly detailně probrány všechny došlé připomínky a Zemský úřad v Praze ohlásil vodoprávní řízení dle Vodního zákona ze dne 28. srpna 1870. Rovněž stanovil nový projekt s hlavními parametry, čímž opustil definitivně původní návrh z roku 1923 zabývající se využitím obou řek a to jak Vydry, tak Křemelné. Hlavní technické parametry byly:

- Využití plavebního kanálu v délce 9,5 km.
- Položení tlačného potrubí v délkách 531 a 900 m.

- Elektrárna Vydra osazena 2 soustrojími s Francisovými horizontálními turbínami s výkonem 3,2 MW, hltnost 1,85 m³/s, čistý spád 215,5 m, třífázový generátor 6 MVA, napětí 6,6 kV, otáčky 1000 ot./min., provoz elektrárny 14 hodin/denně.
- Akumulační nádrž 65.000 m³ vody s kolísáním hladin 4,5 m s přelivem do řeky Křemelné. Přítok do akumulace 1,86 m³/s (+-10 %).
- Vyrovnávací komora (Vodní zámek) s kolísáním hladiny 11 m.
- Vyrovnání kolísání průtoku vody v Otavě nádržemi o obsahu 12.800 m³ na řece Vydrě pod elektrárnou a 16.200 m³ na řece Křemelné.
- Vykoupení potřebných pozemků, zamezení dotčení práva rybolovného a plavebního.
- Určení parcel s vlivem na výstavbu.
- Finanční podíl ZČE na stavbě a jejich odběr el. energie.
- Doporučení odkoupení elektrárny patřící Kašperským Horám – Čeňkovy Pily.

Zemský úřad v Praze následně vydal výměr na vodoprávní řízení a udělil ZČE koncesní oprávnění na provozování elektrárny po dobu 90 – ti let. Spolu s tím byla uzavřena smlouva se Státními lesy o provozování části Vchynicko – Tetovského plavebního kanálu.

V projektu byla stavba rozdělena na dílčí části:

- Akumulační nádrž
- Úbočný zděný kanál
- Úbočné tlačné potrubí do Vodního zámku o průměru 1100 mm
- Tlačné potrubí z Vodního zámku do elektrárny
- Elektrárna
- Vyrovnávací komora – Vodní zámek
- Ubytovna

Stavba byla zahájena 29. dubna 1937, kdy do konce roku byly postaveny základy budovy elektrárny, postavena první část trasy od vtokového objektu Mechov o délce 246 m a průměru 1.500 mm z dřevěných rour z modřínového dřeva. Dále pak pokračování vodní cesty železo – betonovým potrubím systému Vianini o průměru 1.400 mm a délce 461 m. Následně opět modřínovými rourami o průměru 1.000 mm a délce 867 m kde vedla pod silnicí spojující obce Srní a Prášily. V dalším úseku pak zděným krytým kanálem o rozměrech 1.400 x 1.500 mm a délce 700 m, na který navazovalo betonové potrubí systému Vianini o průměru 1.400 mm a délce 912 m až do místa akumulace nádrže pod vrcholem Sedlo.

Odpadní kanál do Křemelné z akumulční nádrže byl projektem stanoven v délce 500 m. V následujícím roce 1938 bylo vystavěno také tlačné potrubí systému Vianini o průměru 1.100 mm a délce 546 m směrem do elektrárny. Podrobná mapa je uvedena na (obrázku 6) – viz příloha.

Po obsazení pohraničí po Mnichovském diktátu 29. září 1938 se práce na výstavbě zdržely. Nicméně po jmenování německého vedení ZČE se vyvinula velká snaha o dokončení celého projektu. Na stavbu akumulční nádrže bylo povoláno 220 lidí, převážně francouzských zajatců. Na jaře roku 1941 byla akumulční nádrž napuštěna a 4. ledna 1942 byla elektrárna v plném provozu.

Po osvobození roku 1945 převzali elektrárnu zpět do rukou čeští odborníci a velkým úsilím zvládali veškerý provoz. Nicméně se postupně začaly objevovat problémy na vodním potrubí a to hlavně v úsecích, kde bylo instalováno dřevěné modřínové roury. Tyto po zhruba 20 – ti letém provozu vykazovaly velké netěsnosti a to hlavně v místech nejvyššího tlaku. Proto začátkem 60. let bylo toto potrubí nahrazeno betonovým s gumovým utěsněním rour. Takový spoj byl stažen ocelovým pásem a celý pak překryt betonovým nákrůžkem. Takto bylo všechno dřevěné potrubí postupně nahrazeno a toto řešení trvá dodnes. Další provozní problémy se objevily v souvislosti s promrzáním plavebního kanálu u Antýglu, kdy byl kanál natolik naplněn ledem, že voda tekla mimo kanál a podemlela silnici mezi Srním a Modravou.

V roce 1988 bylo provedeno dokonalé utěsnění akumulční nádrže a mezi lety 1989 a 1993 byla provedena rekonstrukce elektrického zařízení elektrárny, kdy vznikla nová rozvodna 110 kV (obrázek 8) – viz příloha, pak i nová vnitřní rozvodna 22 kV a byl plně automatizován řídicí systém buzení a fázování generátorů.

2.3 Shrnutí čtyř významných šumavských elektráren

V předcházejícím textu jsem se snažil stručně popsat zajímavé 4 šumavské elektrárny, které jsou svým jedinečným historickým vývojem zařazeny mezi naše národní technické památky, které jsou navíc stále provozovány. Všechny tyto technická díla byly ve své době plně srovnatelné s obdobnými elektrárnami ve světě a snesou srovnání i se současnými vodními díly. Tyto krásná díla svědčí o velkých technických znalostech našich předků.

Čachrov – první veřejná vodní elektrárna v Rakousku – Uhersku (1902).

Čeňkova Pila – v nezměněné formě provozována dodnes. (1912).

Černé jezero – první přečerpávací elektrárna v Československu (1930).

Vydra – elektrárna s nejvyšším spádem pro Francisovy turbíny (1939).

3 Perspektivy dalšího rozvoje malých vodních děl v oblasti Šumavy

V ČR již v podstatě byly vyčerpány možnosti rozvoje velkých vodních děl. Nicméně na poli malých vodních děl je stále velký prostor pro jejich rozvoj. Ve prospěch stále hraje fakt, že stát jim garantuje vyšší výkupní ceny (viz kapitola 7 - Ekonomické zhodnocení...) a také fakt, že v poslední době se u některých projektů návratnost investovaných finančních prostředků propadla i pod 15 let. Vodní energie je energie z obnovitelných zdrojů a výhodou je, že mají nízkou údržbový provoz, neprodukují žádné provozní emise, nepotřebují ke svému provozu jakékoliv fosilní palivo. Dodávky el. energie do sítě lze lépe ovládat, nedochází k nárazovému zatížení jako u fotovoltaiky nebo větru. Další výhodou je, že MVE většinou pokrývají spotřebu v místě jejich instalace (malé ztráty přenosem apod.). Jsou tedy stabilním zdrojem a navíc umí vykrývat špičkové zatížení elektrizační soustavy. Nevýhodou vodní energie je její ovlivňování vodních poměrů a tedy i ekologie vodního toku na kterém stojí. Každá elektrárna se na ovlivnění poměrů podílí různým způsobem dle její konstrukce, umístění, velikosti.

Další faktor pro rozhodnutí a s tím související povolení vodního díla je současná legislativa. Jedná se zejména o zákon č. 254/2001 Sb., o vodách - tzv. Vodní zákon, vyhláška č. 590/2002 Sb., o technických požadavcích na vodní dílo (změna vyhláškou č. 367/2005 Sb.), vyhláška č. 142/2005 Sb., o plánování v oblasti vod, zákon č. 50/1976 Sb., o územním plánování a stavebním řádu – tzv. Stavební zákon.

Tento soubor právních norem upravuje způsob ochrany vod, nakládání s nimi, způsob staveb a provozování vodních děl, práva a povinnosti majitelů vodních děl apod.

V předmětné oblasti Šumavy, tedy v prostoru obou plavebních kanálů je v současnosti již značné množství MVE (obrázek 14) – viz příloha. Nicméně dle mého názoru je zde stále velký potenciál pro budování MVE a to i s ohledem na popsané nevyužité návrhy Ing. Karla Koseka, které jsem do rešerže rovněž zahrnul. Pro toto konstatování je i fakt, že srážkové úhrny v posledních 10 - ti letech (obrázek 15) – viz příloha, kdy panovalo více sucho, jsou v této oblasti stále vysoké. Určitou překážkou jsou však administrativní překážky a hlavně výkupy potřebných pozemků, což je patrné i při přípravě MVE Vydra. Na druhou stranu však existuje mnoho společností, které nejenže nabízí vybudování MVE, ale i jejich správu či pozdější převzetí od velkých distribučních společností E.ON a.s., ČEZ, a.s. apod.

Potenciál je tedy pořád stále velký a momentálně spíše záleží na pochopení majitelů budoucích MVE, že je potřeba se o vodní tok řádně starat v souladu s potřebami ochrany

přírody a krajiny a od majitelů předmětných pozemků, že daná MVE může být přínosem pro daný region.

Výroba elektřiny z takového obnovitelného zdroje, jako je voda, prostřednictvím MVE, při zachování ochrany přírody a krajiny a samozřejmě vyhovění legislativě, by měla být chápána také jako určitá služba, která by se měla umět zaplatit, ale ekonomika by neměla být chápána jako nejdůležitější a jediný parametr při rozhodování o provedení projektu MVE.

4 Dělení vodních elektráren

Použité zdroje [9, 10, 11, 12, 13, 14, 16, 17, 22]

Vodní elektrárny (dále jen „VE“) obecně dělíme podle několika hledisek. Hlavní hlediska jsou koncepce řešení vodní energie toku, velikost spádu, podle způsobu provozu, podle konstrukce budov a podle velikosti instalovaného výkonu (dle normy ČSN 75 0120).

4.1 Koncepce řešení vodní energie toku

Řešení říční – voda přiváděná na turbínu neopouští své říční koryto s elektrárna je umístěna přímo v řece. Elektrárna je umístována do tělesa jezu či přehrady nebo pod ně. Příklady: přehradní, jezové, pilířové elektrárny. Toto řešení vytváří na energeticky využitelných tocích za sebe řazené kaskády (jezové schodiště). Efektivita využití tohoto řešení z pohledu využití energie daného vodního toku je vyšší, pakliže jsou jednotlivé schody provedeny jako akumulární nádrže (přehrady).

Řešení derivační – voda opouští své koryto a je vedena k turbíně buď svým kanálem nebo potrubím, štolou, šachtou. Od turbíny je vyvedena odpadním kanálem zpět do řeky. Toto řešení je projektováno jako zkrácení vodní cesty a tím získání vyššího spádu.

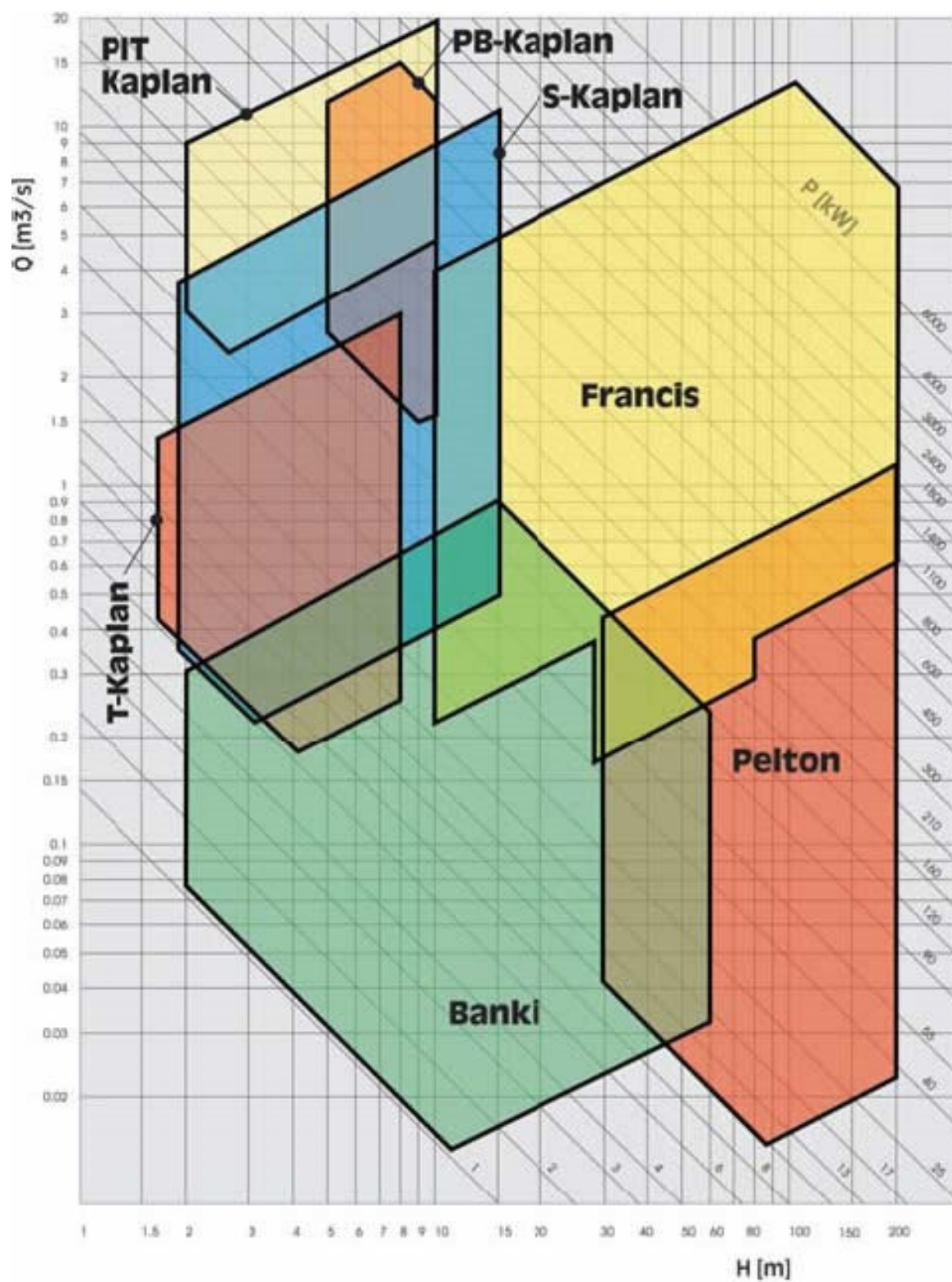
4.2 Velikost spádu

Nízkotlaká elektrárna – obvyklý spád pod 20 m. Voda přitéká často až do ústí kašny turbíny. Není potřebný přiváděcí ani odpadní tlakový kanál.

Středotlaká elektrárna – obvyklý spád 15 – 50 m.

Vysokotlaká elektrárna – obvyklý spád nad 50 m.

Pro středotlakou a vysokotlakou vodní elektrárnu je budován tlakový přivaděč vody ústící na turbíny.



Graf 1: Přehled použitelnosti vodních turbín dle spádu a průtoku. [12]

4.3 Způsob provozu elektrárny

Průběžná VE – nemá akumulční nádrž, obvykle postavena v tělese jezu. Jelikož průtok vody není stálý vlivem výkyvů dle aktuální hydrologické situace, tak i její výkon je kolísavý.

Špičkové VE – má akumulční nádrž, obvykle postavena ihned u přehrady. Vlivem možnosti regulace průtoku ze zásob vody nad ní, tak je zejména používána na krytí špičkového zatížení distribuční sítě.

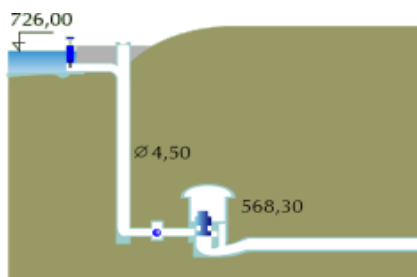
Přečerpávací VE – také kategorie špičkové elektrárny. Buduje se jako akumulátor pro uchování energie. V době levného tarifu při nadbytku el. energie v síti tento odebere na čerpání vody do své akumulční nádrže a v době špičkového zatížení potřebnou el. energii zase dodá. V současné době je zvláště efektivní vzhledem k nestálosti výroby el. energie z větrných a fotovoltaických elektráren. Její velká výhoda je stabilizace sítě v době nedostatku a přebytku el. energie.

4.4 Konstrukce budov

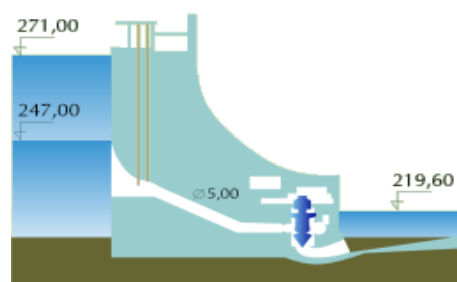
Zastřešené a nezastřešené elektrárny

Nadzemní a podzemní elektrárny – u podzemních elektráren rozlišujeme:

- **Švédský typ** - kdy příváděcí kanál je svislý a odpadní kanál je téměř horizontální a dlouhý (obrázek 16). Toto řešení nepotřebuje vyrovnávací komoru a má jeden tlakový uzávěr ve vtokovém objektu nad zemí. V ČR je to např. elektrárna na vodní nádrži (VN) Lipno I se dvěma turbínami typu Francis (2 x 60 MW).
- **Švýcarský typ** - příváděcí kanál je šikmý, jeho délka může dosahovat i 20 km a odpadní kanál je horizontální krátký (obrázek 17). Toto řešení je nejčastěji stavěno s vyrovnávací komorou. Přívodní tlaková štola (kanál) a celé přívodní vedení vody má vysoký počet uzávěrů jak u vtoku tak i ve vyrovnávací komoře. Největší elektrárna tohoto typu se nachází v Kanadě, řeka Kemano s instalací 16 Peltonových turbín a celkovým instalovaným výkonem 1 696 MW.



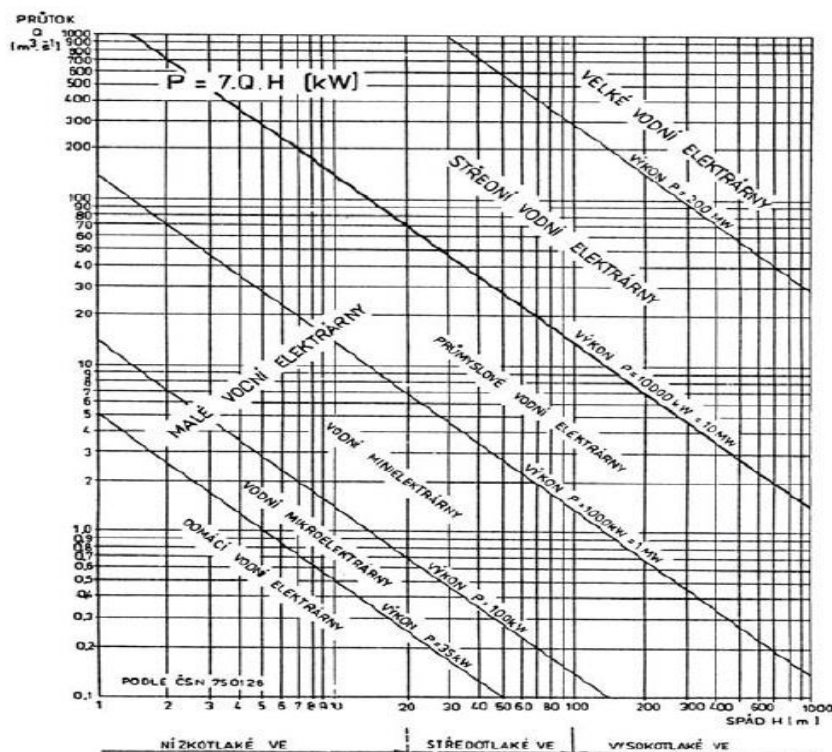
Obrázek 16: Švédský typ. [22]



Obrázek 17: Švýcarský typ. [22]

4.5 Instalovaný výkon dle normy ČSN 75 0128

- domácí elektrárny – instalovaný výkon do 35 kW
- mikro elektrárny – instalovaný výkon 35 kW - 100 kW
- mini elektrárny – instalovaný výkon 100 kW – 1 000 kW
- průmyslové elektrárny – instalovaný výkon 1 MW - 10 MW



Graf č.2: Dělení vodních elektráren podle instalovaného výkonu. [9]

5 Skladba malé vodní elektrárny

Použité zdroje [9, 10, 11, 14, 16, 17, 18, 19, 20, 21,23]

Skladbu vodní elektrárny můžeme rozdělit na stavební konstrukce, strojní zařízení – vodní turbíny a elektrotechnické zařízení.

5.1 Stavební konstrukce

Podle stavební konstrukce vodní elektrárny rozlišujeme na VE jezové, přehradové a derivační. Často se setkáme s kombinací tohoto rozdělení na přehradní – derivační – tedy přehrada s derivací a následně umístěným vodním dílem či naopak. Do stavebních konstrukcí však patří i další nezbytné součásti vodní děl:

- vtokové objekty, usazovací nádrže,
- přiváděcí a odpadní derivační vedení vody,
- vyrovnávací komory,
- budovy vodních elektráren.

5.1.1 Vtokové objekty, usazovací nádrže

Vtokový objekt slouží na přívod vody do přiváděcího vedení do vodní elektrárny. Jeho podstatnou vlastností je minimální hydraulická ztráta, zamezení naplavenin jako jsou cizí předměty unášené vodou, ledové kry nebo tříšť, apod. Proto vtokový objekt obsahuje i zařízení na zamezení cizích předmětů jako jsou česle a usazovací nádrže. Vtokové objekty rozlišujeme dle druhu na tlakové a beztlakové nebo pak dle umístění na součást jezového či přehradního tělesa nebo objekty na březích řek a nádrží a nebo objekty sdružené s jinými objekty.

U vtokového objektu je důležité jeho provedení tak, aby docházelo k plynulému růstu či poklesu rychlosti proudění vody. U vtokových objektů ústících do tlakového přiváděče, musíme dbát o umístění horní hrany vtoku pod minimální hladinu nádrže z důvodu zajištění i minimálního provozu elektrárny, ochrany před zimním zamrzáním hladiny a nebezpečím nasávání vzduchu na turbíny. U nízkotlakých vodních elektráren pak horní hrana vtoku musí být umístěna nad předpokládanou hranicí zanášení dané nádrže z důvodu zamezení nasávání úsad na turbíny.

Česle máme nejčastěji v pevném nebo vysouvacím provedení. Jejich propustnost se volí dle velikosti a konstrukci turbíny (turbín). Rozteč jednotlivých průlin (filtrační mezery) je nejčastěji volena z rozměrů 30, 60, 90, 120 mm. Rychlost proudění vody u česlí čistěných strojním mechanismem nemá překročit $1,2 \text{ m.s}^{-1}$ v zimním zámrazném období pak $0,8 \text{ m.s}^{-1}$. Úhel sklonu česlí je pak u vysouvacího systému 90° a u pevného (strojně čistěného) 70° . Za česlemi je pak umístěn vždy uzávěr. Pro potřebné opravy, revize přiváděcího vedení vody na turbíny a i samotných turbín je proveden každý uzávěr na celém systému tak, aby mohl zároveň sloužit i jako jedinný. Tzn. Je dostatečně odolný tlaku vody. Uzávěr za česlemi je pak nutno vybavit i proti zámrazným opatřením.

Usazovací nádrže dělíme na hrubé splaveniny a jemné plaveniny. U hrubých splavenin je vhodné znát režim na toku, kdy víme o způsobu a množství transportu splavenin. Podle toho pak zvolíme vhodný systém odplavení mimo vodní turbíny. A to buď vytvořením odběrného zařízení v konkávním oblouku toku nebo vytvořením umělé konkávy před vtokovým objektem případně umístit pevný práh s výhonem. U derivací se umísťují

duté betonové prahy kolmo na směr toku se šikmou filtrační mříží, která zamezí průniku šterku určité hrubosti. Voda pak odtéká pod mříží do přivaděče a zbývající množství vody pak odplavuje šterky zachycené nad mříží. Jemné plaveniny pak řešíme sedimentací. K tomu musíme snížit a zrovnoměnit rychlost proudění v celém průměru usazovací nádrže na 0,3 až 0,5 m.s⁻¹.

Plochu průtočného průřezu usazovací nádrže určíme dle vztahu:

$$S = \frac{Q}{v} \quad (\text{m}^2) \quad (5.1)$$

Kde: S je plocha průřezu usazovací nádrže (m²), Q je průtok vody (m³s⁻¹) a v je rychlost průtoku vody (m.s⁻¹).

Rychlost klesání zrn závisí na teplotě vody, tvaru zrn a typu proudění (turbulentní proudění zpomaluje usazování). Usazovací nádrže pak musíme vyčistit. Proto je dělíme ještě na typy s občasným a nepřetržitým proplachem úsad.

Občasný proplach – takové nádrže jsou buď jedno nebo více komorové. Jednokomorová má nevýhodu v tom, že po dobu proplachu musí být uzavřena, čímž je i přivaděč mimo provoz. Tudíž se defacto nepoužívá. U více komorových nádrží dochází k proplachům postupně bez omezení funkce přivaděče.

Nepřetržitý proplach – tyto typy nádrží jsou konstrukčně vyřešeny do tvaru nálevky, dolů se zužující, kdy splaveniny klouzají po stěnách do kanálu, který prochází pod nejužším místem nálevky. Princip funguje na zvýšení rychlosti proudění v zužujícím se odvodu. Toto proplachování se děje v době přebytku vody. U proplachu tak není přivaděč mimo provoz. Nevýhoda je spotřeba většího množství vody. Kvůli zamezení obrusu lopatek turbín jemným pískem se ve spodní části strojovny budují odpískovací kanály. Každá turbína má zpravidla dva tyto kanály.

5.1.2 Přivaděcí a odpadní derivační vedení vody

Derivační vedení vody je umělý kanál odvádějící vodu z toku řeky k vodnímu dílu a pak zpět do řeky. Buduje se z důvodu získání co nejvyššího spádu. Můžeme tuto derivaci rozdělit na:

- beztlakovou s volnou hladinou,
- tlakovou,
- smíšenou.

Dle funkce pak můžeme dělit na:

- přivaděč vody z toku do elektrárny případně k nádrži před ní,
- odpadní vedení od elektrárny k toku,
- víceúčelové vedení jak k energetickým, tak k zemědělským či vodní dopravě, zásobování apod.

Z pohledu stavby jsou přivaděče ještě děleny na:

- zařízení budované v hornině,
- zařízení budované v zemině,
- vybudované prostřednictvím stavebních materiálů (beton, dřevo, ocel, aj.).

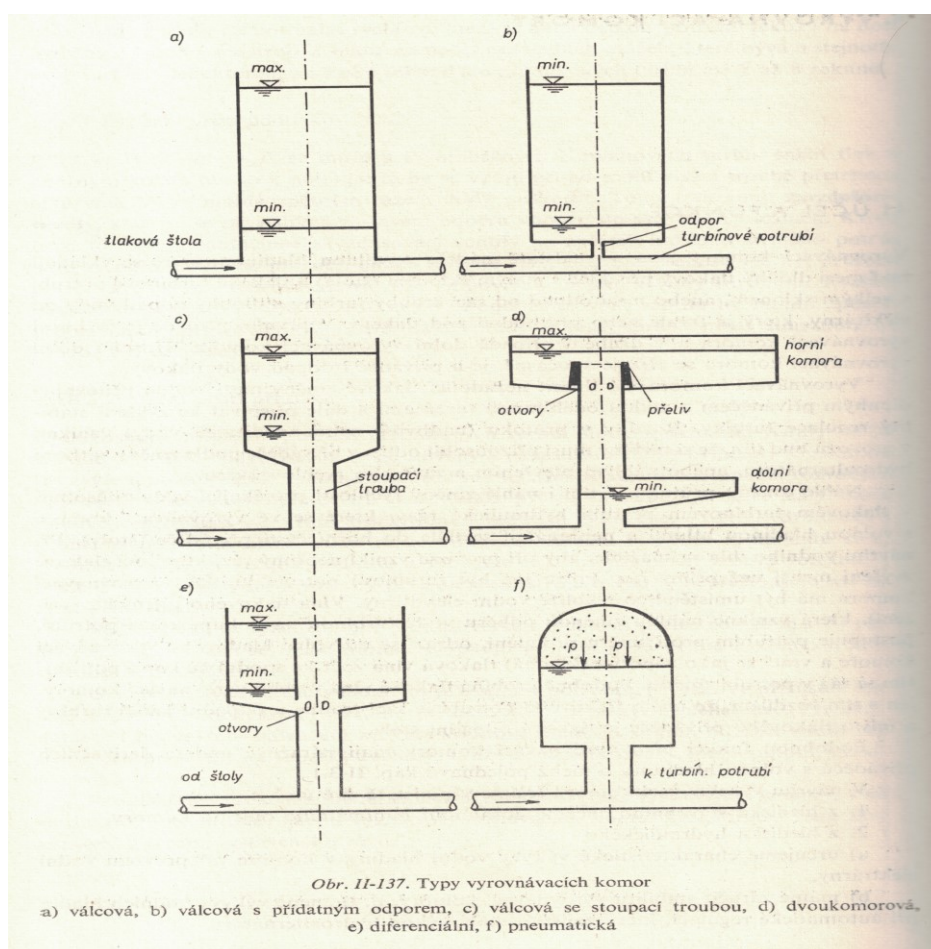
Malé vodní elektrárny s beztlakým derivačním vedením se budují na středních nebo spodních úsecích toků. Budují se v místech s vyšším zastoupením rezidenčních, komerčních nebo zemědělských ploch. Investiční náklady na vybudování vodních elektráren jsou zde tedy značně vyšší a z toho důvodu se neprosazuje elektrárna přehradová.

Větší přívodní kanály pro vodní díla jsou specifická tím, že vyžadují dlouhé hráze, čímž musí být pečlivě nasypány nad okolní terén, musí být dobře zatěsněny. Oproti tomu u odpadních kanálů je potřeba hlubšího zapuštění do terénu hlavně ihned pod vodní elektrárnou a tyto svahy se musí opevnit. V dlouhých přivaděčích může docházet k vodním rázům vlivem zastavení nebo otevření uzávěrů. Z toho důvodu se zřizuje nárazová nádrž před vtokem do elektrárny, která tyto rázy eliminuje. Na začátku přivaděčího vedení se zřizují usazovací nádrže. Trasy kanálu mohou vést různým terénem, proto se dle posouzení celé trasy na místech, kde je to potřebné budují buď shybky nebo akvadukty. Shybka je potrubí vedoucí pod nějakou stavbou (zpravidla komunikací) a akvadukt je pak přemostění. Přivaděč pak musí vést vodu s co nejnižšími hydraulickými a průsakovými ztrátami.

5.1.3 Vyrovnávací komory

Vyrovnávací komory jsou budovány buď před strojovnou turbíny (horní vyrovnávací komora) nebo pod ní (spodní vyrovnávací komora). Komory se zřizují vždy, pokud je přivaděcí nebo odpadní potrubí tlakové. Jejím funkcí je tlumit tlakové změny mezi přivedenou vodou a vodou odebranou turbínou a také obdobně v případě dolní komory. Vyrovnávací komora také pomáhá při stabilitě regulace turbíny. V navrhování komory se řeší problematika její velikosti a hydraulika při provozu vodní elektrárny. Typy vyrovnávacích komor (obrázek 18):

- Válcová šachtová (podzemní) nebo věžová (nadzemní) – jednoduchá konstrukce kruhového průměru. Budovaná pro menší elektrárny.
- Dvoukomorová – konstrukce je málo citlivá náhlým krátkým rázům, je vhodná pro díla s většími rozdíly hladin. Nevýhodou je malá hydraulická stabilita. Takové komory musí být budovány ve skále.
- Diferenciální komora – uplatňuje se jako věžová stavba, je citlivá na změnu zatížení.
- Pneumatická komora – v uzavřeném prostoru nad vodní hladinou je vzduch, který funguje jako tlumič. Při zvýšení hladiny se stlačí a tak vzestup utlumí.



Obrázek 18: Typy vyrovnávacích komor. [23]

5.1.4 Budovy vodních elektráren

Budovy vodních elektráren rozlišujeme na části výrobně – technologické a ostatní provozní části (administrativa, sociální zázemí, sklady apod.). Výrobně – technologická část obsahuje strojovnu, rozvodnu a venkovní technologická zařízení. Tato část je pak dělená na horní a spodní stavbu, kdy spodní část má charakter vodní stavby, jelikož je zde umístěno

zařízení pro vodní stavby typické – česle, vtoky, uzávěry apod. Z pohledu statiky se zde projevují nejvyšší zatížení – vztlak, průsaky apod. Horní část pak často obsahuje technologii nutnou pro servis turbín, alternátorů, setrvačníků apod. Dle typu a způsobu umístění turbín, tedy dle projektového návrhu, může, i veškerá technologie od turbíny přes setrvačník k alternátoru, být součástí horní stavby, což je příklad MVE Vydra. V případě více pater budovy je v jednotlivých podlahách pamatováno na odpovídající otvory, kterými je pak portálový jeřáb dané zařízení schopen spustit. Blokované transformátory a rozvodny vysokého napětí jsou pak umísťovány mimo budovu.

Budova musí být stabilní, proto se řeší její stabilita z pohledu všech působících sil. Stavebně se řeší usmyknutí celé stavby, možné překlopení, možné zdvižení, napětí v základové spáře, síly vztakové na strojovnu, tíhy kompletního strojního vybavení, stabilita pod základových vrstev, rázy vyvolané pojezdem jeřábu, hydrostatický tlak včetně hydraulického rázu vtoku do komory turbíny, statické a dynamické síly práce hydroalternátoru apod.

Z pohledu stavby takového vodního díla jako je vodní elektrárna je potřebná spolupráce odborníků z oblasti stavební, strojní, elektro a také architektonického, pakliže má stavba sloužit desetiletí.

5.2 Strojní zařízení

Strojní zařízení vodních elektráren tvoří vodní soustrojí, což je:

- Hydro-alternátor – více pólový rotační elektrický stroj měnící mechanickou energii na elektrickou.
- Motor-generátor – více pólový rotační elektrický stroj měnící mechanickou energii na elektrickou a dokáže to i opačně.
- Vodní stroj – sem patří vodní motor a čerpadlo. Patří sem i vodní turbína, což je rotační vodní motor jehož rotace je způsobena mechanickou energií vody přes lopatkové oběžné kolo. Vodní turbína je tedy základní celek potřebný pro využívání vodní energie.

Dělení turbín:

- Přenosu energie vody na oběžné kolo:
 - Reakční rovnotlaké a přetlakové turbíny – přeměna kinetické i tlakové energie zároveň. (Kaplanova, Francisova, diagonální, vrtulová).
 - Akční rovnotlaké turbíny – přeměna pouze kinetické energie (Peltonova).

- Směr průtoku vody vzhledem k hřídeli:
 - Axiální – rovnoběžný směr s osou hřídele turbíny (Girardova, Kaplanova, vrtulová, přímoproudá).
 - Radiální – kolmý směr na osu hřídele turbíny.
 - Dostředivé – pomaloběžná Francisova turbína.
 - Odstředivé – Fourneyronova turbína.
 - Radial-axiální – směr proudění se mění z kolmého na rovnoběžný nebo opačně (rychloběžná Francisova turbína).
 - Diagonální – směr proudění je šikmý na osu hřídele turbíny (diagonální turbína Deriazova či Kvjatkovského).
 - Tangenciální – směr proudění je mimoběžně kolmý – tečný směr (Peltonova).
- Poloha hřídele:
 - Vertikální – většina turbín mimo přímoproudové.
 - Horizontální – velké přímoproudové turbíny.
 - Šikmý hřídel – menší turbíny, např. přímoproudová.
- Rovnoměrnost vtoku na oběžné kolo:
 - Plný vtok – voda vtéká po celém obvodu (všechny turbíny se spirálou)
 - Částečný vtok – voda vtéká pouze části obvodu (Schwamkrugova a Peltonova).
- Počet oběžných kol na společném hřídeli:
 - Jednoduchá – pouze jedno oběžné kolo turbíny.
 - Dvojitá a vícenásobná – dvě nebo více oběžných kol, mají však odděleny přívod vody nebo savky nebo obojí.
 - Zdvojená – dvě oběžná kola v těsné blízkosti, mají společný přívod vody (turbína HONE).
- Smysl rotace oběžného kola:
 - Jednosměrná – kolo se otáčí vždy jedním směrem (pravotočivé, levotočivé).
 - Obousměrná – kola se otáčí při turbínovém provozu jedním směrem a opačně pak při čerpadlovém provozu.

5.2.1 Základní parametry turbín

Každá turbína má tyto základní pracovní parametry. Tzn. veličiny popisující vnitřní hydraulické vlastnosti (průtok, spád), tak energetické parametry (počet otáček, výkon, účinnost).

- Spád	H	(m)
- Průtok	Q	(m ³ s ⁻¹)
- Počet otáček	n	(ot. min ⁻¹)
- Výkon	P	(kW)
- Účinnost	η	(%)

Spád turbíny H je využitelná mechanické energie vody. Rozlišujeme hrubý a čistý (užitný) spád. Hrubý spád představuje potenciální energii vody využitelnou mezi jejím vstupním a výstupním profilem. Vzhledem k tomu, že žádná turbína není schopna využít potenciální energii přímo, tak musíme potenciální energii přeměnit na kinetickou a tlakovou energii (reakční turbíny) a nebo pouze kinetickou energii (akční turbíny). Při přeměně energie vyjdou vždy ztráty a tak lze z potenciální energie využít pouze její část, což je čistý spád. V projektu vodní elektrárny je používán návrhový spád, což je čistý spád, na který je turbína objednána u výrobce. Při malém čistém spádu by při rozumném výkonu elektrárny vycházely velmi velká oběžná kola. Z důvodu ekonomie je tedy doporučeno, aby u elektráren malých výkonů nebyl užitný spád menší jak 1,5 m a u větších výkonů pak nemá klesnout pod 3 m.

Průtok turbínou Q je množství vody protékající turbínou za jednotku času. Při návrhu turbíny pracujeme s návrhovým průtokem Q_n , který definujeme jako průtok při návrhových hodnotách užitného spádu, výkonu a otáček. Tento průtok je zpravidla průtok s největší četností výskytu na daném toku. Vycházíme z hydrologických údajů.

Počet otáček n musíme volit tak, aby generátor byl schopen respektovat frekvenci střídavého proudu. V Evropě používáme frekvenci $f = 50$ Hz pro což platí tento obecný vztah:

$$f = pn \quad (\text{Hz}) \quad (5.2)$$

Kde: f je frekvence proudu (Hz), p je počet pólových dvojic generátoru a n je počet otáček generátoru (ot.s⁻¹).

V tabulce 3 pak uvádím nejčastěji používané synchronní otáčky u turbín přímo spojených s generátorem. Pakliže použijeme jakýkoliv převod, musíme adekvátně upravit počet otáček generátoru, aby vztah 5.2 platil a nedocházelo pak k dodatečné nutnosti regulace frekvence.

Výkon turbíny P dělíme na teoretický výkon P_0 a užitný výkon P . Teoretický nemůžeme dosáhnout skrze ztráty spotřebované energie na překonání hydraulických odporů jako jsou spirály, oběžná kola, savka aj.

Pro teoretický výkon platí vztah:

$$P_0 = g \cdot Q \cdot H \quad (\text{kW}) \quad (5.3)$$

Pro užitný výkon platí vztah:

$$P = g \cdot Q \cdot H \cdot \eta_t \quad (\text{kW}) \quad (5.4)$$

Kde: P_0 je teoretický výkon a P je užitný výkon (kW), g je gravitační zrychlení ($9,81 \text{ m.s}^{-2}$), Q je průtok turbínou (m^3s^{-1}), H je užitný spád turbíny (m) a η_t je účinnost turbíny ($\eta_t < 1$).

Účinnost turbíny η_t je poměr užitého a teoretického výkonu turbíny. Platí vztah:

$$\eta_t = \frac{P}{P_0} \quad (5.5)$$

U účinnosti platí, že čím vyšší výkon turbíny, tím vyšší účinnost turbíny zejména z důvodů lepšího zpracování a lepšího udržení geometrických tvarů.

5.2.2 Kaplanova turbína

V tomto návrhu MVE volím Kaplanovu turbínu, jelikož jsem si dal jeden z cílů této práce neporovnávat existující, již vyprojektovanou turbínu, nýbrž nastínit možnosti jak se propracovat ke konkrétní turbíně pomocí přepočtových vztahů univerzální charakteristiky pro Kaplanovu turbínu s parametry $\eta = f(n, Q)$; $D_0 = 1 \text{ m}$, $H_0 = 1 \text{ m}$, $\eta_0 = 85\%$. [23].

Pro Kaplanovu turbínu jsem se rozhodl vzhledem k přibližnosti návrhu konkrétního typu turbíny a tím spojené použitelnosti jednotlivých turbín (diagram 1). Vím však, že vývoj jde dopředu i v této oblasti a použitelnost jednotlivých typů turbín je dnes více rozšířená.

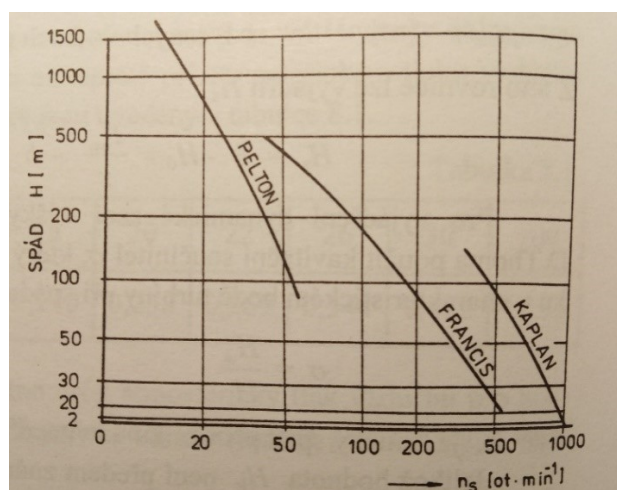
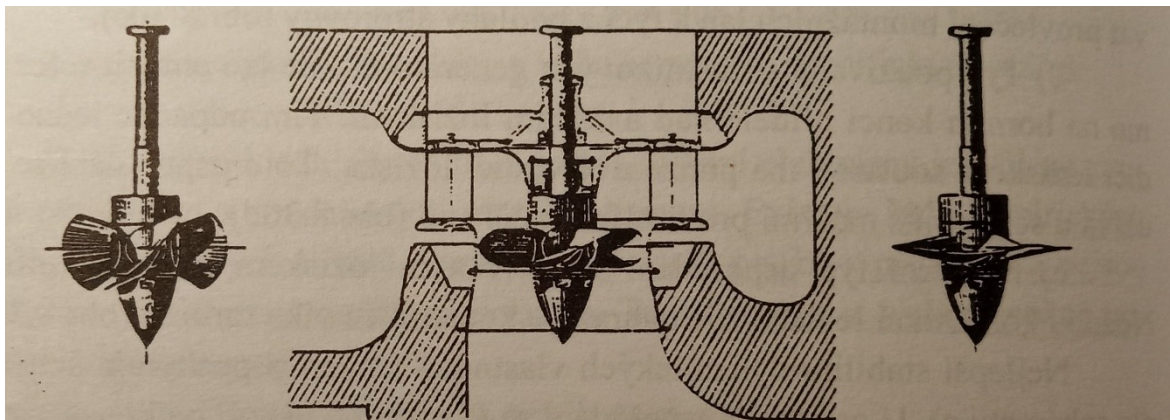


Diagram 1: Použitelnost jednotlivých typů turbín v závislosti na spádu H (m) a specifických otáčkách turbíny n_s (ot.min^{-1}). [37]

Kaplanova turbína je defacto zdokonalená vrtulová turbína panem profesorem Viktorem Kaplanem (27.11.1876 – 23.8.1934), když v roce 1919 po četných překážkách, tuto zdokonalenou, již Kaplanovu turbínu, uvedl do provozu v Dolním Rakousku. Zdokonalení spočívalo v současném natáčení jak rozváděcích lopatek turbínového kola, tak natáčením lopatek oběžného kola (obrázek 19). Tato možnost dvojí regulace je vzájemně propojena vazbou.



Obrázek 19: Oběžné kolo Kaplanovy turbíny. Vlevo zcela otevřeno, na středu polo-otevřeno a vpravo zcela uzavřeno. [37]

Celé řešení turbíny sestává ze vtoku a to buď prostřednictvím spirály nebo kašny, z rozváděcího kola, oběžného kola a savky. Oběžné kolo je umístěno uprostřed pod rozváděcím kolem. Voda po projití rozváděcím kolem na oběžné kolo dále putuje savkou do odpadního kanálu, koryta, nádrže apod.

Lopatky oběžného kola jsou upevněny na konci mohutného náboje, který zabírá cca 1/3 prostoru vstupu vody z turbíny do savky, která se následně rozšiřuje, aby došlo ke snížení rychlosti proudění vody a tak omezenému nebezpečí odtrhnutí vodního sloupce a tak rozvinutí kavitace. Tento náboj je vhodné zapustit i do vstupního profilu savky, aby nedošlo k rychlému zvětšení odtokových ploch, což by rovněž mohlo mít za následek odtrhnutí vodního sloupce.

Při rychlém odvodu vody do savky a savkou do odpadu by docházelo ke snížení tlaku vody až na hranici nasycených vodních par.

Pakliže absolutní tlak vody klesne a na hranici tlaku nasycených vodních par, začne se voda vařit a uvolňování bublinek vzduchu, které po doputování vodním proudem do oblasti s vyšším tlakem vody, implodují. Tato imploze má za následek srážky vodních částic uvnitř bublinek vzduchu a dochází tak k hydraulickému rázu, který přímo namáhá obtékané povrchy a rozrušují je. Tomuto jevu říkáme kavitace.

Kaplanovy turbíny jsou vybavovány zavzdušňovacím ventilem, který je důležitý při úplném uzavření lopatek rozváděcího kola. Tento ventil je umístěn v prostoru pod oběžným kolem a zajišťuje tak zavzdušňování, které je důležité proto, protože vlivem uzavření lopatek rozváděcího kola docházelo k vysokému podtlaku vlivem setrvačnosti vody a snížení tlaku na hodnotu nasycených vodních par. V důsledku toho se odtrhnul vodní sloupec a po vyčerpání energie se vodní sloupec začal vracet k oběžnému kolu, kdy docházelo k nárazům a zvedáním celého soustrojí turbíny.

Kaplanovy turbíny se používají jak s vertikální, tak horizontální osou rotace, kdy u větších soustrojí se navrhuje svislá osa rotace, u menších pak horizontální, která má výhody v menší náročnosti na stavební práce.

5.3 Převody

Převod točivého momentu z turbíny na generátor je jedním z důležitých provozních parametrů celé vodní elektrárny. Zaměřujeme se zde na ztráty, na účinnost a na životnost. Přenos točivého momentu je možný těmito způsoby:

- ozubená soukolí - vyšší účinnost, která rapidně padá s opotřebením, vyšší hlučnost, použití u velkých výkonů vodních děl, ztráty 3 – 10 %,
- řemenový - ploché, ozubené řemeny - nejčastější použití u malých výkonů, levné řešení s malými ztrátami 1 – 5 %,
- řetězový rozvod – použití na vývod točivého momentu na větší vzdálenost od turbíny a také v případě, že je potřeba vývod provést z míst zatopených vodou. Nevýhody jsou krátká životnost, nutnost větší údržby.

5.4 Elektrotechnické zařízení MVE

V rámci návrhu a výstavby vodní elektrárny je rovněž nutná velká pozornost kladená na elektrotechnické zařízení, kterým pak energii vody definitivně předáme do distribuční sítě ke konečné spotřebě. Sem řadíme tyto zařízení:

- Hydroalternátory
- Transformátory
- Rozvadeče
- Vlastní spotřeba
- Rozvodny
- Ovládání a řízení elektrárny

5.4.1 Hydroalternátory

Hydroalternátory rozdělujeme na synchronní a asynchronní generátory.

Synchronní generátor: použití je hlavně u větších elektráren, ale i v případě, že chceme, aby elektrárna byla lokálním zdrojem bez připojení na distribuční síť. Jejich výhodou je, že vyrábí jak činnou, tak jalovou složku proudu. Je složen ze statoru, kde je vedeno třífázové vinutí a rotoru, kterým vede stejnosměrné budící napětí z dynamu (budiče). Při otáčení rotoru se indukují na třífázovém vinutí střídavé napětí, které jsou od sebe vzájemně posunuty o úhel 120° .

Otáčky synchronního stroje jsou určeny dle vztahu:

$$n = \frac{f \cdot 60}{p} \quad (\text{ot.min.}^{-1}) \quad (5.6)$$

Kde: n je počet otáček (ot.min.^{-1}), f je frekvence (50 Hz) a p je počet pólových dvojic (jeden na rotoru a jeden na statoru).

Pakliže je generátor zapojen do distribuční sítě, musíme dbát v případě najeť generátoru o správné přifázování na síť. Proto je nutné dodržet tyto parametry:

- Shoda napětí na stroji se sítí – lze upravit změnou budícího proudu.
- Shoda kmitočtu stroje a sítě – pakliže bude frekvence rozdílná, dochází k nárazu činné složky proudu a tím mechanickému namáhání generátoru vlivem rázového zrychlení nebo zpomalení rotace stroje a tím i turbíny.
- Nulový fázový posun mezi vektory napětí alternátoru a napětí sítě.
- Shoda sledu fází alternátoru a sítě.

Asynchronní generátor: použití je u malých vodních elektráren. Svoji konstrukcí jsou podstatně jednodušší a tím levnější než synchronní generátory. Spojují se s distribuční sítí bez nutnosti synchronizace a fázování. Nevýhodou je, že dodávají do sítě pouze činný výkon a jalový si naopak odebírají z cizího zdroje. Nejčastěji však přímo ze sítě, čímž ji zatěžují odběrem jalového proudu a zhoršují v ní účinník. Kompenzaci jalového proudu můžeme řešit přidáním kondenzátoru. Pro výkon generátoru vyšší jak 35 kW má provozovatel takového stroje povinnost zapojit na svorky kompenzační baterii, kvůli kompenzaci jalového proudu.

Alternátory se připojují přímo do přípojnice distribuční rozvodny a tím mezi alternátory a přípojnici musí být zařazeny vypínače, odpojovače, měřicí transformátory a pojistky. Alternátor má i pomocná technická zařízení na mazání ložisek, chlazení, buzení,

regulaci napětí, sfázování se sítí, brždění, měřicí přístroje (teploty, průtoky a elektrické hodnoty – výkon, napětí, proud, účinník, kmitočet), ovládání, automatizace, ochrany.

5.4.2 Transformátory

V transformátorech se mění napětí střídavého proudu dle principu elektromagnetické indukce Faradayova zákona. Skládá se z uzavřeného magnetického obvodu – primárního vinutí a sekundárního vinutí. Na primárním vinutí prochází napětí o určité hodnotě a vytváří proměnlivé magnetické pole. V sekundárním vinutí se pak indukuje střídavé napětí o jiné hodnotě. Jádru je u vyšších výkonů chlazeno olejem. Ztráty transformátorů jsou poměrně malé (kolem 0,5 % u moderních velkých výkonů). Transformátory se umísťují mimo strojovnu elektrárny. Jejich hmotnost je odvislá od jejich výkonu v řádech 850 kg až 88 tun.

5.4.3 Rozvaděče

Rozvaděče jsou zařízení, které ve vodních elektrárnách obsahují ovládání a signalizaci, měřicí přístroje, pojistky a vypínače. Bývají umístěny tak, aby ze zadní strany byly přístupné pro revize a servis. Ze přední strany jsou pak přístupné pro obsluhu elektrárny. Rozvaděče jsou propojeny se stroji kabely vedenými v zemi kabelovými kanály, které jsou zakryty plechem pro snazší přístup. U větších elektráren s množstvím kabelového vedení a většími vzdálenostmi je toto vedení vedeno v chodbách po stěnách. Ohyby kabelů jsou možné jen většími poloměry aby nedocházelo k lámání pevných drátů. Při svislých vedeních jsou instalovány revizní šachty. Pro vedení velkých proudů jsou použity holé pásové vodiče. Při proudech nad 2.000 A musí být tyto vodiče vedeny mimo blízkost ocelových konstrukcí z důvodu indukce a ohřevu těchto konstrukcí.

5.4.4 Vlastní spotřeba

Elektrárna potřebuje energii pro vlastní chod a pro výrobu elektrické energie. Je potřeba pohánět různé pomocné stroje (provoz turbín, alternátorů, vodních uzávěrů apod.), osvětlení, větrání, eventuálně vytápění. Udává se, že vlastní spotřeba vodní elektrárny je 0,5 – 1 % jejího instalovaného výkonu.

5.4.5 Rozvodny

Rozvodna je bod rozvodu vyrobené el. energie od alternátorů do jednotlivých vedení. Pro každé napětí je budována samostatná rozvodna a mohou být umísťovány uvnitř budov nebo vně. Rozvodny obsahují zařízení pro vypínání a spínání proudu, odpojovače, pojistky, bleskojistky, třífázové přípojnice pro sběr a odvod el. energie do sítě, přístroje pro měření

spotřeby a výroby. Přípojnice a spoje u napětí musí mít předepsané minimální vzdálenosti proti přeskoku náboje proudu. U napětí do 10 kV, což bude případ i návrhu MVE v této práci, je to 125 mm. U vyšších pak vzdálenost samozřejmě roste až např. u 400 kV na 4.000 mm. Pro ochranu obsluhy musí být veškeré elektrické zařízení uzemněny. Pro tento účel se pod stavbou buduje zemní síť tvořená železnými pásy, zemnicími deskami či zaraženými trubkovými elektrodami.

5.4.6 Ovládání a řízení elektrárny

Hlavním místem ovládání elektrárny je dozorna. Ovládají se odsud i hydraulické zařízení (uzávěry, výpusti apod.). Jsou zde umístěny hlavní ovládací, měřicí a ochranné rozvaděče, měřicí přístroje, telekomunikační přístroje apod. Místnosti dozoru jsou uspořádány přehledně, dostatečně prostorově volné, dobře osvětlené. U menších vodních elektráren se dozorny často nebudují vzhledem k nepotřebě stálé obsluhy a velké automatizaci ovládané dálkově. V současné době je naprostá většina elektráren tohoto typu řízena plně automatizovaně především z důvodu zamezení chyb lidského faktoru a úsporu nákladů na lidskou práci. Zároveň je automatizací řešena i rychlost náběhu jednotlivých strojů, kdy se dosahují časy do 90 sekund u největších soustrojí. Taková rychlost je nutná vzhledem k stále větší nutnosti stabilizace elektrizační soustavy.

6 Návrh MVE – praktická část práce

Použité zdroje [23, 24, 25, 26, 27, 28, 29]

6.1 Hydrologické parametry pro návrh MVE

Níže uvedené hydrologické údaje (průtoky, spád) jsou součástí zadání vypracování tohoto návrhu malé vodní elektrárny. Dále se v této práci neuvažuje s asanačním průtokem Q_{asp} (m^3s^{-1}), jelikož je MVE uvažována jako MVE derivační se samostatným přívodním kanálem a uvedený průtok je tedy průtokem využitelným. Spád je v tomto případě uvažován jako spád čistý a konstantní. Vzhledem k tomu, že není součástí této práce konkretizována lokalita, tak uvádím pouze tyto zadané parametry:

- N - leté maximální průtoky (m^3s^{-1}) – viz tabulka 1
- M – denní průtoky (m^3s^{-1}) – viz tabulka 2
- Čistý spád $H = 10$ m

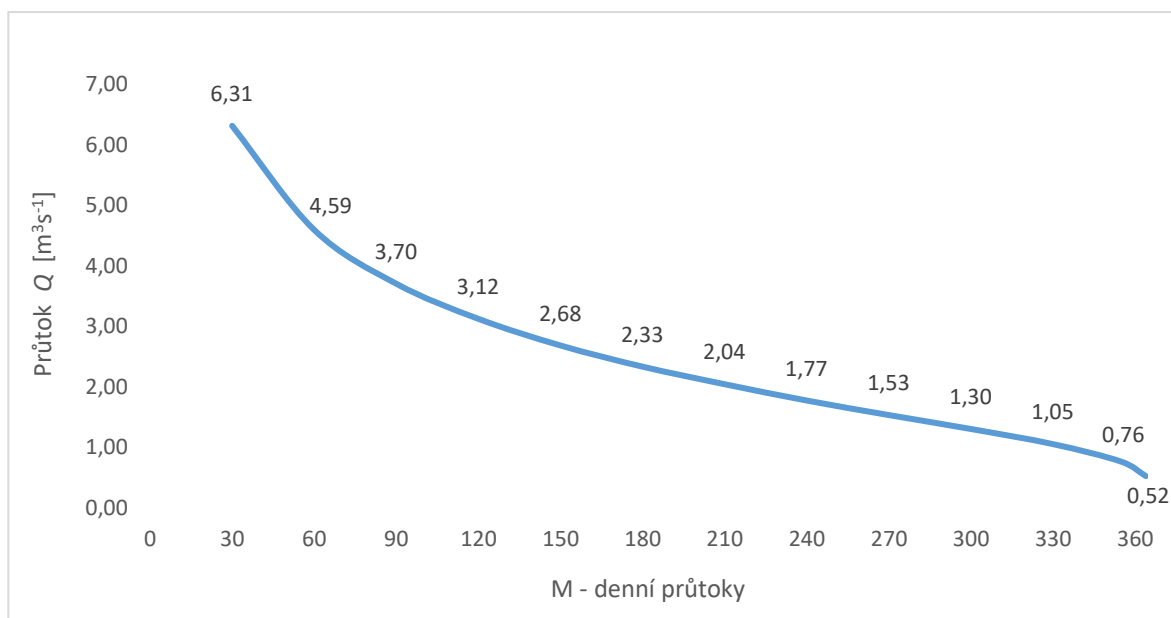
N-leté průtoky	Q_1	Q_2	Q_5	Q_{10}	Q_{20}	Q_{50}	Q_{100}
$Q \text{ [m}^3\text{s}^{-1}\text{]}$	33	48	70	89	109	139	163

Tabulka 1: N – leté maximální průtoky

M - denní průtoky	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	355	364
$Q \text{ [m}^3\text{s}^{-1}\text{]}$	6,31	4,59	3,70	3,12	2,68	2,33	2,04	1,77	1,53	1,30	1,05	0,76	0,52

Tabulka 2: M – denní průtoky

Dle Tabulky 2 jsem sestavil graf roční odtokové křivky:

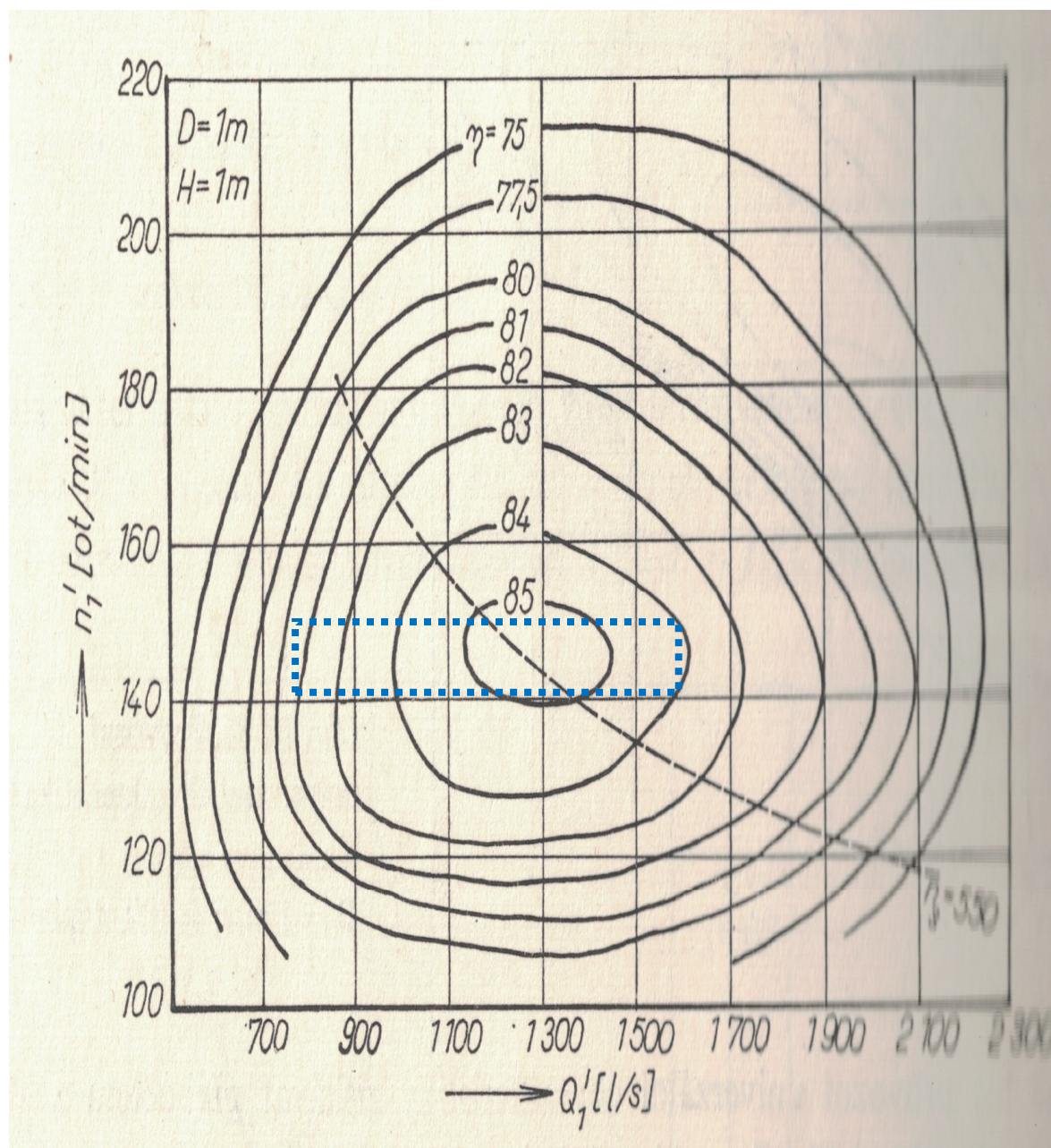


Graf 3: Odtoková křivka.

Malé vodní elektrárny se navrhují (dimenzují) obvykle dle 90 – ti (Q_{90}) až 120 – ti (Q_{120}) denních průtoků. V tomto případě je: $Q_{90} = 3,7 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ a $Q_{120} = 3,12 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$.

Pro navrhované výpočty zvolím průtok na úrovni 120 dnů – tedy $Q_{120} = 3,12 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ z důvodu vyššího možného ročního využití provozu MVE.

Dle zadaných parametrů průtoků a spádu volím Kaplanovu turbínu, u které provedu výpočty – viz kapitola 6.2 dle univerzální charakteristiky Kaplanovy turbíny (graf 4).



Graf 4: Hlavní univerzální charakteristika Kaplanovy turbíny ve veličinách

$$\eta = f(n, Q); D_0 = 1 \text{ m}, H_0 = 1 \text{ m}, \eta_0 = 85\%. [23]$$

6.2 Výpočty pro Kaplanovu turbínu

1. Průtok turbínou:

$$\underline{Q_{120} = 3,12 \text{ m}^3\text{s}^{-1}.$$

2. Průměr navrhované turbíny:

Vypočítám dle zákona podobnosti. Z grafu 4 vybírám hodnoty na úrovni nejvyšší účinnosti – 85%: Průtok $Q_I' = 1,2 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ a otáčky $n_I' = 144 \text{ ot.min}^{-1}$.

$$Q = Q_1' * \frac{D^2 \sqrt{H}}{D_0^2 \sqrt{H_0}} \quad \text{po úpravě:} \quad D = \sqrt{\frac{Q * D_0^2 * \sqrt{H_0}}{Q_1' \sqrt{H}}} = \sqrt{\frac{3,12}{1,2 \sqrt{10}}} \quad (\text{m}) \quad (6.1)$$

$$\underline{D = 0,907 \text{ m.}}$$

Kde D_0 je průměr turbíny v univerzální charakteristice Kaplanovy turbíny (m), Q_I je zvolený průtok v univerzální charakteristice (m^3s^{-1}), H_0 je spád v univerzální charakteristice (m), H je stanovený spád vodního díla (m), D je vypočtený průměr turbíny (m), Q je stanovený průtok turbínou (m^3s^{-1}).

3. Otáčky navrhované turbíny:

Opět dle zákona podobnosti bude rovnice:

$$n = n_1' \frac{D_0 \sqrt{H}}{D \sqrt{H_0}} = 144 \frac{1 * \sqrt{10}}{0,907 * \sqrt{1}} \quad (\text{ot.min}^{-1}) \quad (6.2)$$

$$\underline{n = 502,06 \text{ ot.min}^{-1}.} \quad \text{po určení viz níže} \Rightarrow \underline{500 \text{ ot.min}^{-1}}$$

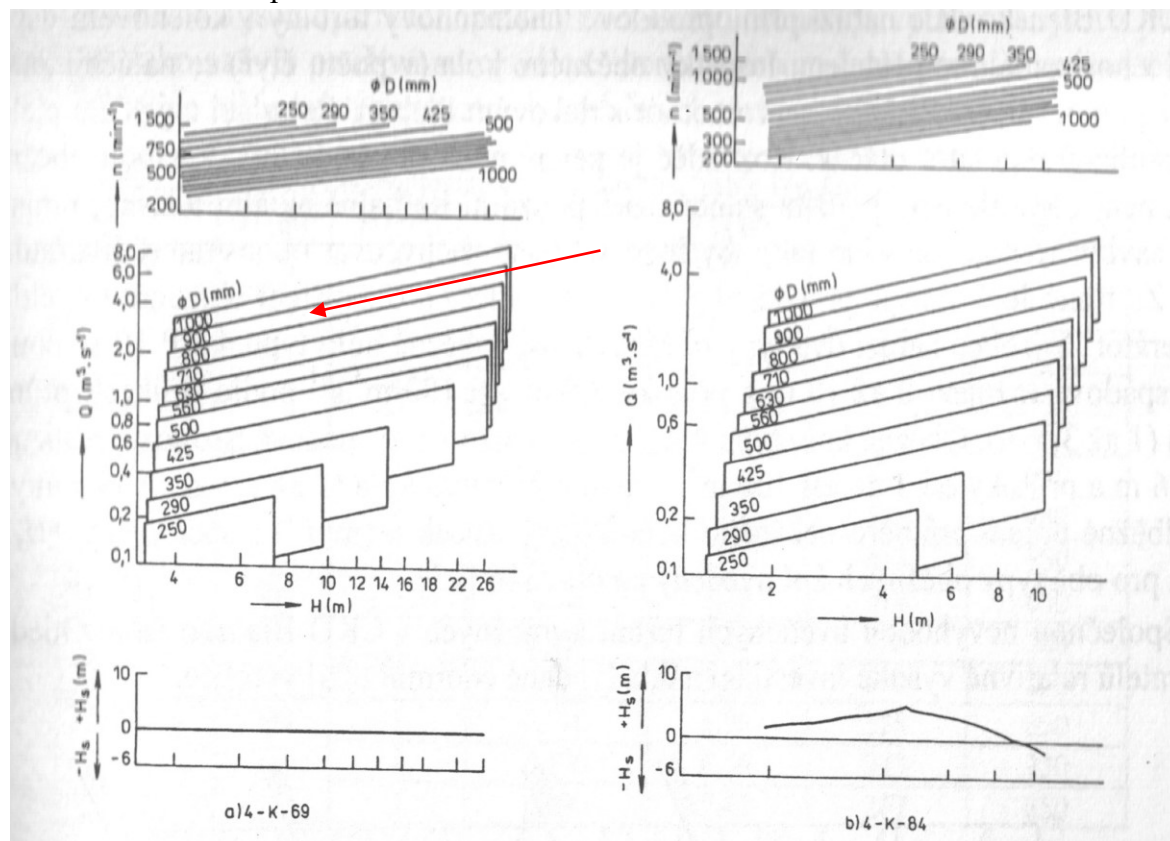
Kde n_1' je počet otáček zvolený v univerzální charakteristice (ot.min^{-1}), n je vypočtený počet otáček navrhované turbíny (ot.min^{-1}).

Vzhledem k předpokladu, že turbína bude spojena napřímo s generátorem, musí tedy pracovat v synchronních otáčkách. Otáčky upravím na nejbližší možné otáčky vhodné pro generátor dle tabulky 3, kde mi vyjde generátor s otáčkami $n_g = 500 \text{ ot.min}^{-1}$, a pólovými dvojicemi $p = 6$.

n_n	3 000	1 500	1 000	750	600	500	428,6	375	333,3	300
p	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
n_n	272,7	250	230,8	214,3	200	187,5	176,5	166,7	157,9	150
p	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
n_n	142,9	136,4	134,4	125	120	115,4	111,1	107,1	103,4	100
p	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
n_n	96,8	93,8	90,9	88,2	85,7	83,3	81,1	78,9	76,9	75
p	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
n_n	73,2	71,4	69,8	68,2	66,7	65,2	63,8	62,5	61,2	60
p	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
n_n	58,8	57,7	56,6	55,6	54,5	53,6	52,6	51,7	50,8	50
p	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60

Tabulka 3: Synchronní otáčky u třífázových generátorů spojených napřímo. [23]

Vypočtený průměr i otáčky navrhované turbíny jsem porovnával s diagramy Kaplanových turbín typu 4-K-69 od výrobce ČKD Blansko – viz obrázek 20. Toto porovnání slouží jako zpětná kontrola správnosti uvedených výpočtů. Diagram uvažované turbíny je označen červenou šipkou.



Obrázek 20: Kaplanovy turbíny ČKD Blansko. [24]

4. Pracovní rozmezí navrhované turbíny

Pro zjištění práce navrhované turbíny ($D = 0,907$ m) v daných hydrologických parametrech ($H = 10$ m), provedu dle přepočtových vztahů přepočet jednotlivých os hlavní univerzální charakteristiky Kaplanovy turbíny (graf 4). Potřebné koeficienty spádu K_h a průměru oběžného kola K_d :

$$K_h = \frac{H}{H_0} = 10 \quad (-) \quad (6.3)$$

$$K_d = \frac{D}{D_0} = 0,907 \quad (-) \quad (6.4)$$

Přepočet osy Q (m^3s^{-1}) přenásobením koeficientem:

$$K_d^2 \sqrt{K_h} = 0,907^2 \sqrt{10} = 2,6 \quad (-) \quad (6.5)$$

Přepočet osy n (ot.min^{-1}) přenásobením koeficientem:

$$\frac{\sqrt{K_h}}{K_d} = \frac{\sqrt{10}}{0,907} = 3,5 \quad (-) \quad (6.6)$$

Musím rovněž určit oblast nejvyšší účinnosti práce turbíny při stanoveném spádu a průtoku. Určím tedy pro horní přímku oblasti minimální spád na úroveň $H = 9$ m. Tomuto spádu budou odpovídat otáčky podle uvedeného vztahu:

$$n'_1 = n \frac{D}{\sqrt{H}} = 500 \frac{0,907}{\sqrt{9}} = \underline{151,2 \text{ ot.min}^{-1}} \quad (6.7)$$

Pro spád $H = 10$ m pak budou otáčky dle vztahu:

$$n'_1 = n \frac{D}{\sqrt{H}} = 500 \frac{0,907}{\sqrt{10}} = \underline{143,4 \text{ ot.min}^{-1}} \quad (6.8)$$

Minimálnímu průtoku, který rovněž určím z důvodu vymezení celé oblasti práce turbíny na úroveň $Q = 2 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ bude odpovídat tento vztah:

$$Q'_1 = \frac{Q}{K_d^2 \sqrt{K_h}} = \frac{2}{2,6} = 0,77 \text{ m}^3\text{s}^{-1} = \underline{770 \text{ l.s}^{-1}} \quad (6.9)$$

Maximálnímu průtoku, který rovněž určím z důvodu vymezení celé oblasti práce turbíny na úroveň $Q = 4 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ bude odpovídat tento vztah:

$$Q'_1 = \frac{Q}{K_d^2 \sqrt{K_h}} = \frac{4}{2,6} = 1,54 \text{ m}^3\text{s}^{-1} = \underline{1\,540 \text{ l.s}^{-1}} \quad (6.10)$$

Pracovní oblast, která je modře orámována (viz graf 4) navržené Kaplanovy turbíny bude pracovat v oblasti s nejvyšších účinností. Konstatuji tedy, že je navržena optimálně.

5. Účinnost navrhované turbíny:

Účinnost je poměr užitého výkonu na hřídeli turbíny k teoretickému výkonu vodního proudu, jež prochází turbínou. U MVE se účinnost zpravidla pohybuje na úrovni $\eta = 0,75$ až $\eta = 0,90$. Pro výpočet účinnosti existuje více vzorců – viz tabulka 4. Dle této tabulky použiji vzorec dle Huttona i z důvodu, že u Kaplanových turbín tvoří cca 70 % ztrát ztráty třením a cca 30 % jsou pak ztráty kinetické, což právě Hutton uvedl ve svém vzorci:

TYP STROJE	PŘEPOČTOVÝ VZTAH	POZNÁMKA
ČERPADLO	$\eta_D = 1 - (1 - \eta_M) \cdot \left(\frac{D_M}{D_D}\right)^{1/4} \cdot \left(\frac{Y_M}{Y_D}\right)^{1/10}$	Pfleidererův vzorec $\frac{1}{12} < \frac{Re_M}{Re_D} < 20$
ČERPADLO AKUMULAČNÍ	$\eta_D = 1 - (1 - \eta_M) \cdot \left[0,5 + 0,5 \cdot \left(\frac{D_M}{D_D}\right)^{1/5} \cdot \left(\frac{Y_M}{Y_D}\right)^{1/10}\right]$	Ackeretův vzorec $\varepsilon = (0,4 + 0,6)$
TURBÍNA FRANCIS	$\eta_D = 1 - (1 - \eta_M) \cdot \left(\frac{D_M}{D_D}\right)^{1/5}$	Moodyho vzorec exponent $< 0, 0,26 >$
TURBÍNA KAPLAN	$\eta_D = 1 - (1 - \eta_M) \cdot \left[0,3 + 0,7 \cdot \left(\frac{D_M}{D_D}\right)^{1/5} \cdot \left(\frac{Y_M}{Y_D}\right)^{1/10}\right]$	Huttonův vzorec Platí i pro propeler.t.
TURBÍNA FELTON	$\eta_D = \eta_M$	Účinnost se nepřepočítává
ČERPADLOVÁ TURBÍNA RADIÁLNÍ	$\eta_D = 1 - (1 - \eta_M) \cdot \left[0,5 + 0,5 \cdot \left(\frac{D_M}{D_D}\right)^{1/5} \cdot \left(\frac{Y_M}{Y_D}\right)^{1/10}\right]$	Ackeretův vzorec pro čerpadlový režim
	$\eta_D = 1 - (1 - \eta_M) \cdot \left[0,2 + 0,8 \cdot \left(\frac{D_M}{D_D}\right)^{1/6} \cdot \left(\frac{Y_M}{Y_D}\right)^{1/12}\right]$	Osterwalderův vzorec pro turbinový režim
ČERPADLOVÁ TURBÍNA DIAGONÁLNÍ	$\eta_D = 1 - (1 - \eta_M) \cdot \left[0,3 + 0,7 \cdot \left(\frac{D_M}{D_D}\right)^{1/5} \cdot \left(\frac{Y_M}{Y_D}\right)^{1/10}\right]$	Huttonův vzorec pro čerpadlový režim
	$\eta_D = 1 - (1 - \eta_M) \cdot \left(\frac{D_M}{D_D}\right)^{1/6,5}$	Moodyho vzorec pro turbinový režim

Tabulka 4: Přepočtové vztahy pro jednotlivé vodní čerpadla a turbíny. [27]

$$\begin{aligned}
 \eta_t &= 1 - (1 - \eta_0) * \left[0,3 + 0,7 \cdot \left(\frac{D_0}{D}\right)^{1/5} \cdot \left(\frac{H_0}{H}\right)^{1/10}\right] = \\
 &= 1 - (1 - 0,85) * \left[0,3 + 0,7 \cdot \left(\frac{1}{0,907}\right)^{1/5} \cdot \left(\frac{1}{10}\right)^{1/10}\right] \quad (\%) \quad (6.11) \\
 \underline{\eta_t = 0,87} &\Rightarrow \underline{87\%}
 \end{aligned}$$

6. Průběžné otáčky:

Průběžné otáčky nastanou po odpojení zátěže – tedy generátoru od sítě. Neměly by překračovat násobky otáček o koeficient viz tabulka 5.

n (ot.min ⁻¹)	50	300	400	500	600	800	1000
$násobek$ (-)	1,6	1,8	1,9	2	2,1	2,4	2,6-3

Tabulka 5: Násobky provozních otáček udávající maximální průběžné otáčky.

$$n_{max} = n'_{max} * \sqrt{H} * \frac{1}{D} = 210 * \sqrt{10} * \frac{1}{0,907} \quad (\text{ot.min}^{-1}) \quad (6.12)$$

$n_{max} = 732,17 \text{ ot.min}^{-1}$, což je < než $n * 2$ (koeficient z tabulky 5).

Kde n_{max} jsou maximální otáčky (ot.min⁻¹).

7. Předpokládaný elektrický výkon na hřídeli turbíny

$$P_1 = g * H * Q * \eta_t = 9,81 * 10 * 3,12 * 0,87 \quad (\text{kW}) \quad (6.13)$$

$P_1 = 266,3 \text{ kW}$

Kde P_1 je předpokládaný elektrický výkon (kW).

Dle literatury se uvádí následující účinnosti:

Převod: $\eta_{př} = 80$ až 100 %, zdroj: [26]. Volím hodnotu $\eta_{př} = 0,95$.

Generátor: $\eta_g = 90$ až 98 %, zdroj: [29]. Volím hodnotu $\eta_{př} = 0,96$.

Transformátor: $\eta_{tr} = 85$ až 99 %, zdroj: [28]. Volím hodnotu $\eta_{př} = 0,98$.

8. Předpokládaný elektrický výkon soustrojí MVE

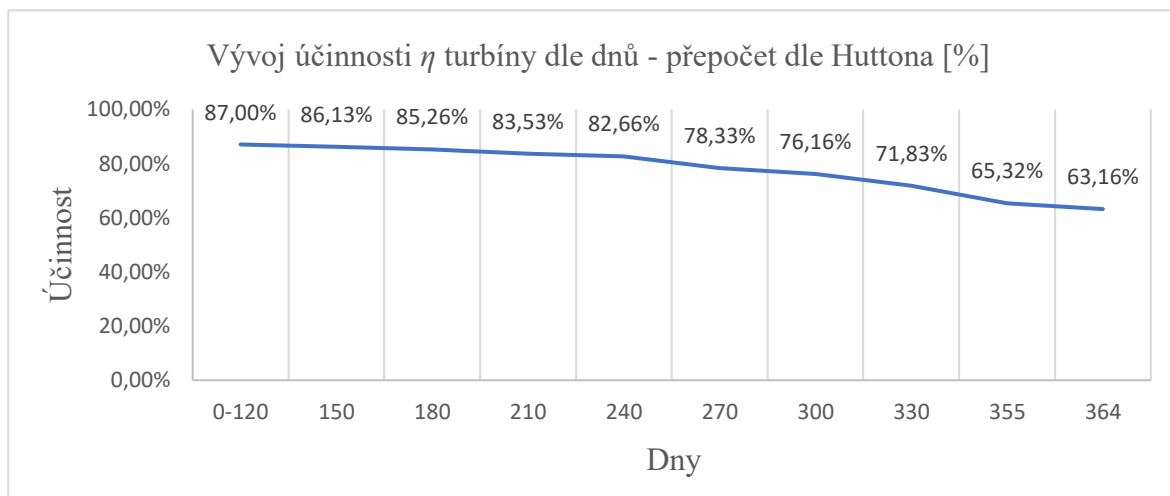
$$P_e = P_1 \cdot \eta_{př} \cdot \eta_g \cdot \eta_{tr} = 266,3 \cdot 0,95 \cdot 0,96 \cdot 0,98 \quad (\text{kW}) \quad (6.14)$$

$P_e = 238 \text{ kW}$

Kde P_e je předpokládaný elektrický výkon soustrojí (kW), je $\eta_{př}$ je účinnost převodu z turbíny na generátor (-), η_g je účinnost generátoru (-), η_{tr} je účinnost transformátoru (-).

6.3 Odhadovaná výroba elektrické energie z navrhované turbíny

Dle účinnosti v univerzální charakteristice Kaplanovy turbíny jsem provedl přepočty dle Huttonova vztahu na navrženou Kaplanovu turbínu dle kapitoly 6.2. V grafu 5 uvádím vývoj celkové přepočtené účinnosti turbíny v jednotlivých dnech odtokové křivky.



Graf 5: Vývoj celkové účinnosti turbíny dle dnů z odtokové křivky.

V tabulce 6 je uveden i přepočet předpokládaného elektrického výkonu na hřídeli turbíny i na soustrojí MVE po započtení předpokládané účinnosti převodu, generátoru a transformátoru.

Průtok od Q (m^3s^{-1})	Průtok do Q (m^3s^{-1})	η dle univerzální charakteristiky (%)	η přepočet dle Huttona (%)	Výkon na hřídeli turbíny (kW)	Výkon soustrojí (kW)	Odtoková křivka (dny)	Rozmezí odtokové křivky (dny)
3,12	2,99	0,850	0,8700	266,3	238,0	120	0 - 120
2,6	2,99	0,840	0,8613	219,7	196,3	30	150
2,21	2,6	0,830	0,8526	184,8	165,2	30	180
1,95	2,08	0,810	0,8353	159,8	142,8	30	210
1,69	1,95	0,800	0,8266	137,0	122,5	30	240
1,43	1,56	0,750	0,7833	109,9	98,2	30	270
1,3	1,43	0,725	0,7616	97,1	86,8	30	300
1,04	1,17	0,675	0,7183	73,3	65,5	30	330
0,65	0,78	0,600	0,6532	41,7	37,2	25	355
0,52	0,65	0,575	0,6316	32,2	28,8	9	364

Tabulka 6: Výpočty předpokládaného elektrického výkonu MVE

V tabulce 7 uvádím předpokládanou výrobu elektřiny z tohoto návrhu MVE.

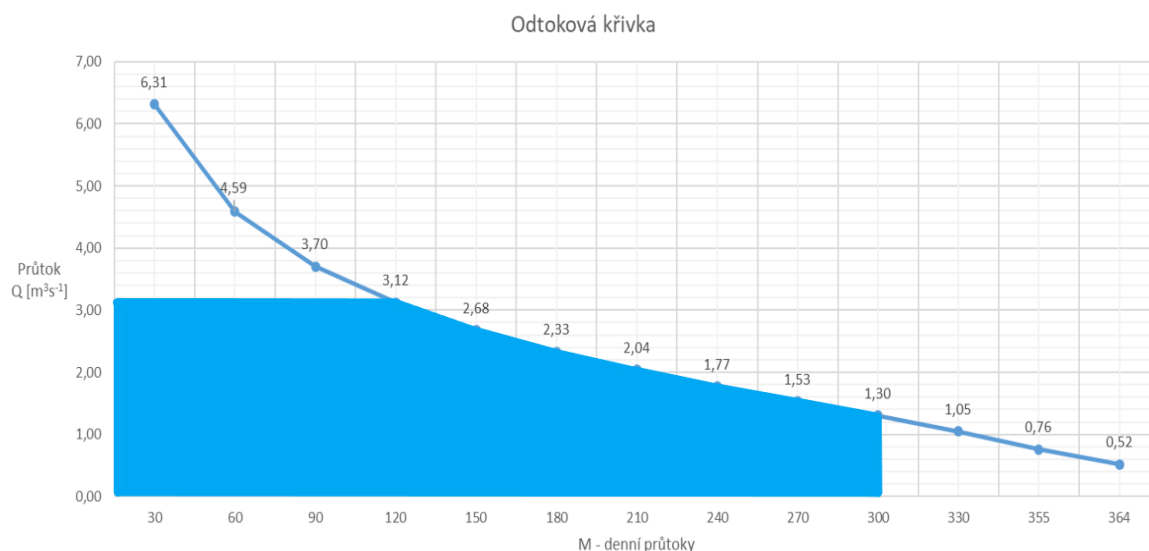
Průtok Q (m ³ s ⁻¹)	Výkon soustrojí (kW)	Odtoková křivka (dny)	Rozmezí odtokové křivky (dny)	Počet provozních hodin	Výroba elektrické energie (kWh)
3,12	238,0	120	0 - 120	2880	685 419
2,68	196,3	30	150	720	141 368
2,33	165,2	30	180	720	118 949
2,04	142,8	30	210	720	102 825
1,77	122,5	30	240	720	88 187
1,53	98,2	30	270	720	70 711
1,3	86,8	30	300	720	62 502
1,05	65,5	30	330	720	47 159
0,76	37,2	25	355	600	22 336
0,52	28,8	9	364	216	6 220
Celkem vyrobená elektrické energie (kWh)					1 345 675

Tabulka 7: Celková předpokládaná výroba elektrické energie z MVE.

Vzhledem k tomu, že účinnost turbíny pod 75 % je již značně neefektivní, předpokládám, že v tyto dny bude MVE odstavena na úkony pravidelných servisních kontrol a oprav. Proto upravím i celkovou výrobu elektrické energie a tím i předpokládaného využití MVE – znázorněno v tabulce 8.

Průtok Q (m ³ s ⁻¹)	Výkon soustrojí (kW)	η přepočet dle Huttona (%)	Odtoková křivka (dny)	Rozmezí odtokové křivky (dny)	Počet provozních hodin	Výroba elektrické energie (kWh)
3,12	238,0	87,00%	120	0 - 120	2 880	685 419
2,68	196,3	86,13%	30	150	720	141 368
2,33	165,2	85,26%	30	180	720	118 949
2,04	142,8	83,53%	30	210	720	102 825
1,77	122,5	82,66%	30	240	720	88 187
1,53	98,2	78,33%	30	270	720	70 711
1,3	86,8	76,16%	30	300	720	62 502
1,05	0,0	0,00%	30	330	0	odstávka
0,76	0,0	0,00%	25	355	0	odstávka
0,52	0,0	0,00%	9	364	0	odstávka
Celkem vyrobená elektrické energie (kWh)						1 269 961

Tabulka 8: Celková předpokládaná výroba elektrické energie včetně plánovaných odstávek.



Graf 6: Využitelná oblast odtokové křivky do 75 % účinnosti turbíny.

6.4 Vlastní spotřeba MVE

Vlastní spotřeba MVE se dle literatury pohybuje mezi 0,5 – 1 % instalovaného výkonu. Je to spotřeba pro vlastní chod elektrárny, pro pohon jejích pomocných zařízení jako je například osvětlení, větrání, pomocné stroje pro servisní úkony apod.

Vzorec pro výpočet vlastní spotřeby:

$$E_{vl.s.} = \frac{E_{skut}}{100} = \frac{1\,269\,961}{100} \quad (\text{kWh}) \quad (6.15)$$

$$E_{vl.s.} = \underline{\underline{12\,700 \text{ kWh}}}$$

Kde $E_{vl.s.}$ je spotřeba elektrické energie na vlastní spotřebu (kWh) a E_{skut} je skutečná předpokládaná výroba elektrické energie (kWh).

6.5 Celková vyrobená elektrická energie

Celková vyrobená energie dodávaná do distribuční sítě je tedy:

$$E_{celk} = E_{skut} - E_{vl.s.} = 1\,269\,961 - 12\,700 \quad (\text{kWh}) \quad (6.16)$$

$$\underline{\underline{E_{celk} = 1\,257\,261 \text{ kWh}}}$$

Kde E_{celk} je celková předpokládaná elektrická energie dodávaná do sítě (kWh).

7 Ekonomické zhodnocení návrhu MVE

Použité zdroje [30, 31, 32]

V této části se věnuji ekonomice celého návrhu MVE. Uvádím zde možnosti dotačního financování platné k datu psaní této práce (dotace z MPO - OP PIK) a dále pak provozní podpory v rámci cenového rozhodnutí Energetického regulačního úřadu (dále jen „ERÚ“). Dále pak uvádím pouze měrné investiční náklady dle platné legislativy, jelikož v této práci nekonkretizuji typy, výrobce a aktuálně platné ceny součástí tohoto návrhu MVE. K měrným investičním nákladům pak vztahuji i propočet návratnosti.

7.1 Dotace

Při realizaci výstavby MVE je stále možné žádat o dotace z operačních programů Ministerstva průmyslu a obchodu, dále jen „MPO“ a jeho dotačního programu – operační program podnikání a inovace, dále jen „OP PIK“ – obnovitelné zdroje energie, kde výstavba nebo rekonstrukce MVE je přímo zahrnuta a to pro malý nebo střední podnik.

Výše podpory:

- malý podnik 80 % způsobilých výdajů,
- pro střední podnik pak 70 % způsobilých výdajů.

Vybrané podmínky:

- projekt musí být v tomto případě realizován mimo Prahu,
- instalovaný výkon nesmí být vyšší jak 10 MW,
- účinnost turbíny, měřená na spojce turbíny, vyšší nebo rovna 85 %.

Další podmínky jsou specifikovány přímo ve výzvě.

Všechny výše vybrané podmínky by tato MVE splnila bez potíží. Ani ostatní podmínky však nejsou nijak problematické.

7.2 Provozní podpora – výkupní ceny, zelené bonusy

Energetický regulační úřad vydává mimo jiné i pravidelné nařízení o systému provozních podpor výroby elektřiny z obnovitelných zdrojů. Pro rok 2020 je dle cenového rozhodnutí č.3/2019 tato podpora členěna následovně:

„Podle ustanovení § 1 odst. 3 zákona o podporovaných zdrojích energie a oznámení Evropské komise SA.35177 (2014/NN) se v provozní podpoře na elektřinu z obnovitelných zdrojů podle tohoto cenového rozhodnutí pro výrobní nebo zdroje z obnovitelných zdrojů energie uvedené do provozu od 1. ledna 2013 včetně, s výjimkou malých vodních elektráren uvedených do provozu od 1. ledna 2016 včetně, zohledňuje jakákoliv nevratná investiční podpora z veřejných prostředků poskytnutá od 1. ledna 2013 včetně. Dnem poskytnutí investiční podpory se rozumí den nabytí právní moci rozhodnutí o poskytnutí investiční podpory, případně den účinnosti smlouvy nebo jiného právního aktu o poskytnutí investiční podpory. Investiční podpora se při poskytnutí provozní podpory podle tohoto cenového rozhodnutí zohledňuje snížením výše provozní podpory následujícím způsobem:“ [31]

ř./sl.	Kategorie výroby	Výše nevratné investiční podpory [%]									
		od	do (včetně)	od	do (včetně)	od	do (včetně)	od	do (včetně)	od	do (včetně)
		-	20	20	30	30	40	40	50	50	-
a		b		c		d		e		f	
850	Výroba elektřiny využívající vodní energii	0,0 %		14,0 %		21,0 %		28,0 %		35,0 %	
851	Výroba elektřiny využívající větrnou energii										
852	Výroba elektřiny využívající geotermální energii										
853	Výroba elektřiny využívající energii slunečního záření										
854	Výroba elektřiny využívající energii ze spalování komunálního odpadu										
870	Výroba elektřiny využívající energii ze spalování biomasy	0,0 %		4,5 %		6,5 %		9,0 %		11,5 %	
871	Výroba elektřiny využívající energii ze spalování bioplynu včetně spalování skládkového a kalového plynu z ČOV										

Tabulka 9: Výše investiční nevratné podpory [31]

„Podle ustanovení § 1 odst. 3 zákona o podporovaných zdrojích energie a podle oznámení SA.43182 (2015/N), oznámení SA.43451 (2015/N) a oznámení SA.45768 (2016/N) se v provozní podpoře podle tohoto cenového rozhodnutí pro malé vodní elektrárny a výrobní tepla - bioplynové stanice uvedené do provozu od 1. ledna 2016 včetně a pro výrobní elektřiny využívající k výrobě elektřiny proces vysokoúčinné kombinované výroby elektřiny a tepla (dále též „KVET“) uvedené do provozu nebo rekonstruované od 1. ledna 2016 včetně zohledňuje jakákoliv nevratná investiční podpora z veřejných prostředků, a to snížením výše provozní podpory o redukční faktor (RF), přičemž:“ [31]

$$RF = \frac{(DOT * AF)}{VYR},$$

kde:

$$AF = \frac{IRR}{1 - \frac{1}{(1+IRR)^{DŽ}}}$$

pro elektřinu: $VYR = P * PRV$

pro teplo: $VYR = P * PRV * 3,6$

<i>RF</i>	...	<i>redukční faktor (Kč/MWh); (Kč/GJ v případě podpory na teplo),</i>
<i>DOT</i>	...	<i>celková investiční dotace udělená projektu (Kč),</i>
<i>AF</i>	...	<i>amutní faktor (-),</i>
<i>DŽ</i>	...	<i>doba životnosti výroby elektřiny nebo tepla stanovená podle jiného právního předpisu⁴⁾ (rok); doba odpisování 15 let (SA.45768 (2016/N)) v případě podpory na elektřinu z KVET (rok),</i>
<i>IRR</i>	...	<i>vnitřní výnosové procento uvedené v žádosti o udělení investiční dotace (v části energetický audit dle vyhlášky č. 480/2012 Sb., ve znění pozdějších předpisů ($\frac{\%}{100}$)).</i>
<i>VYR</i>	...	<i>roční množství vyrobené elektřiny (MWh), roční množství vyrobeného tepla (GJ),</i>
<i>P</i>	...	<i>elektrický instalovaný výkon výroby elektřiny v případě podpory na elektřinu (MW_e), tepelný instalovaný výkon výroby tepla v případě podpory na teplo (MW_t),</i>
<i>PRV</i>	...	<i>průměrné roční využití instalovaného výkonu za dobu životnosti podle jiného právního předpisu⁴⁾ (kWh_e/kW_e); (kWh_t/kW_t v případě podpory tepla); provozní hodiny v případě KVET.</i>

⁴⁾ Vyhláška č. 296/2015 Sb., o technicko-ekonomických parametrech pro stanovení výkupních cen pro výrobu elektřiny a zelených bonusů na teplo a o stanovení doby životnosti výroby elektřiny a výroby tepla z obnovitelných zdrojů energie, ve znění pozdějších předpisů.

Obrázek 21: Výřez z cenového rozhodnutí ERÚ č.3/2019 [31]

Dle stejného cenového rozhodnutí ERÚ č.3/2019 jsou stanoveny výkupní ceny a zelené bonusy. Avšak dle bodu 1.6.7 je u MVE s instalovaným výkonem nad 500 kW včetně uvedených do provozu po 1.1.2016 včetně možné čerpat pouze zelený bonus, nikoliv tedy výkupní cenu. Pro tento návrh se však vejde do této podmínky a pro výpočet návratnosti využijí výkupní ceny ponížené o výpočty dle obrázku 21.

Podporovaný druh energie	Datum uvedení výroby do provozu		Jednotarifní pásmo provozování		Dvoutarifní pásmo provozování		
			Výkupní ceny [Kč/MWh]	Zelené bonusy [Kč/MWh]	Zelené bonusy [Kč/MWh]		
	od (včetně)	do (včetně)			VT	NT	
ř./sl.	a	b	c	j	k	n	o
100	Malá vodní elektrárna ve stávajících lokalitách	-	31.12.2004	2 239	1 294	1 370	1 255
101		1.1.2005	31.12.2013	2 870	1 925	2 140	1 817
102		1.1.2014	31.12.2014	2 814	1 869	-	-
103		1.1.2015	31.12.2015	2 759	1 814	-	-
104		1.1.2016	31.12.2016	2 705	1 760	-	-
105		1.1.2017	31.12.2017	2 349	1 404	-	-
106		1.1.2018	31.12.2018	2 303	1 358	-	-
107		1.1.2019	31.12.2019	2 258	1 313	-	-
108		1.1.2020	31.12.2020	2 214	1 269	-	-
110	Rekonstruovaná malá vodní elektrárna	-	31.12.2013	2 870	1 925	2 140	1 817
111		1.1.2014	31.12.2014	2 814	1 869	-	-
112		1.1.2015	31.12.2015	2 759	1 814	-	-
113		1.1.2016	31.12.2016	2 705	1 760	-	-
114		1.1.2017	31.12.2017	2 349	1 404	-	-
115		1.1.2018	31.12.2018	2 303	1 358	-	-
116		1.1.2019	31.12.2019	2 258	1 313	-	-
117		1.1.2020	31.12.2020	2 214	1 269		
120	Malá vodní elektrárna v nových lokalitách	1.1.2006	31.12.2007	3 189	2 244	2 470	2 130
121		1.1.2008	31.12.2009	3 375	2 430	-	-
122		1.1.2010	31.12.2010	3 668	2 723	-	-
123		1.1.2011	31.12.2011	3 586	2 641	2 650	2 726
124		1.1.2012	31.12.2012	3 737	2 792	-	-
125		1.1.2013	31.12.2013	3 711	2 766	-	-
126		1.1.2014	31.12.2014	3 638	2 693	-	-
127		1.1.2015	31.12.2015	3 567	2 622	-	-
128		1.1.2016	31.12.2016	3 322	2 377	-	-
129		1.1.2017	31.12.2017	2 909	1 964	-	-
130		1.1.2018	31.12.2018	2 852	1 907	-	-
131		1.1.2019	31.12.2019	2 796	1 851	-	-
132	1.1.2020	31.12.2020	2 741	1 796			

Tabulka 10: Výkupní ceny a zelené bonusy dle ERÚ pro rok 2020 [31]

7.3 Měrné investiční náklady

Měrné investiční náklady použiji, jelikož se v této práci nezabývám cenovou konkretizací jednotlivých částí MVE, tedy nemám přístup ke všem aktuálním cenám jednotlivých komponent v čase a místě. V případě projektu MVE samozřejmě provedu výběrové řízení na jednotlivé dodavatele a zhotovitele díla, kde pak budou jednotlivé položky detailně naceněny. Po tomto nacenění dojde v projektu k upřesnění ekonomiky celého díla. V této práci je tedy uveden pouze způsob možného postupu.

Měrné investiční náklady jsou uvedeny ve vyhlášce č. 296/2015 Sb. „o technicko – ekonomických parametrech pro stanovené výkupních cen pro výrobu elektřiny a zelených bonusů na teplo a o stanovené doby životnosti výroben elektřiny a výroben tepla z obnovitelných zdrojů energie“. [32] Uvádím je zde na kopii přílohy vyhlášky:

Technicko-ekonomické parametry a doby životnosti výroben elektřiny a výroben tepla z bioplynu

Výrobní elektřiny

I. Energie vody - Vodní elektrárny

1. Doba životnosti výrobní elektřiny: 30 let.
2. Požadavek účinnosti využití primárního obsahu energie (měřeno na spojení turbíny):
 - a) účinnost nově instalované turbíny v provozním optimu: $\geq 85 \%$,
 - b) účinnost renovovaného staršího typu turbíny v provozním optimu: $\geq 80 \%$.
3. Měrné investiční náklady a roční využití instalovaného výkonu:

Charakteristika výrobní elektřiny	Měrné investiční náklady [Kč/kW _e]	Průměrné roční využití instalovaného výkonu za dobu životnosti [kWh _e /kW _e]	Horní hranice rozsahu ročního využití instalovaného výkonu [kWh _e /kW _e]
Malá vodní elektrárna v nových lokalitách	< 140000	> 4000	4800
Malá vodní elektrárna ve stávajících lokalitách nebo rekonstruovaná	< 115000	> 4000	4800

Pozn.: V případě ročního využití instalovaného výkonu se jedná o netto hodnotu, tzn. sníženou o technologickou vlastní spotřebu elektřiny.

Obrázek 22: Příloha vyhlášky č. 296/2015 Sb. [32]

Z přílohy vyhlášky je patrné, že hraniční měrné investiční náklady jsou 140 000 Kč / kW_e, což v případě tohoto návrhu bude pro investiční náklady MVE vyčísleno na:

$$IN = MIN \cdot P_I \quad (\text{Kč}) \quad (7.1)$$

$$IN = 140\,000 \cdot 266,3$$

$$\underline{IN = 37\,282\,000 \text{ Kč}}$$

Kde IN jsou investiční náklady MVE (Kč), MIN jsou měrné investiční náklady (Kč) a P_I je instalovaný výkon v provozním optimu na spojení turbíny (kW).

V příloze je stanovena i podmínka, kdy „horní hranice rozsahu ročního využití instalovaného výkonu“ nesmí přesáhnout hodnotu 4 800 kWh_e/kW_e a počítá se s čistou hodnotou instalovaného výkonu poníženou o vlastní spotřebu elektřiny na chod elektrárny. A další podmínka, že „průměrné roční využití instalovaného výkonu za dobu životnosti“ je větší jak hodnota 4 000 kWh_e/kW_e. Tedy:

$$P_{hraniční} = \frac{E_{skut} - E_{vl.s.}}{P_1} = \frac{1\,269\,961 - 12700}{266,3} \quad (\text{kWh}_e/\text{kW}_e) \quad (7.2)$$

$$\underline{P_{hraniční} = 4\,721,22 \text{ kWh}_e/\text{kW}_e}, \text{ což je } < \text{jak } 4\,800 \text{ a zároveň } > 4\,000$$

Kde $P_{hraniční}$ je horní hranice rozsahu ročního využití instalovaného výkonu (kWh_e/kW_e).

7.4 Výpočet dotace

Výpočet dotace dle bodu 7.1, kdy výše podpory pro malý podnik je 80% způsobilých výdajů. Způsob výpočtu způsobilých výdajů je odečtení od způsobilých výdajů nového zdroje – v tomto případě tohoto návrhu MVE od referenčního klasického hnědouhelného zdroje pro výrobu elektřiny o výkonu 660 MW viz tabulka 11.

Referenční blok 660 MW		
Měrné investiční náklady	n_{ir} (Kč/KW)	49 613
Doba využití maxima referenčního zdroje za rok ⁶	T_{mr} (hod)	6 000
Vlastní spotřeba referenčního zdroje	ϕ_s (%)	6,7%

Tabulka 11: Hodnoty referenčního zdroje

Vzorec pro výpočet je:

$$ZV = IN_{oze} - n_{ir} * \frac{W_{oze} * 1\,000 * (1 - \phi_{soze})}{T_{mr} * (1 - \phi_s)} \quad (\text{Kč}) \quad (7.3)$$

$$ZV = 37\,282\,000 - 49\,316 * \frac{1\,269,9 * 1\,000 * (1 - 0,01)}{6\,000 * (1 - 0,067)}$$

$$\underline{\underline{ZV = 26\,206\,594 \text{ Kč}}}$$

Kde ZV jsou způsobilé výdaje (Kč), IN_{oze} jsou investiční náklady nové MVE (Kč), n_{ir} jsou měrné investiční náklady na jednotku instalovaného výkonu referenčního zdroje (Kč/kW), W_{oze} je roční výroba elektrická energie z OZE na svorkách generátoru (MWh/rok), ϕ_{soze} je vlastní spotřeba MVE (0,01), T_{mr} je doba využití maxima referenčního zdroje (6 000 h), ϕ_s je vlastní spotřeba referenčního zdroje (0,067).

Ve výpočtu postupuji dle uvedeného příkladu „*Výroba elektřiny z OZE*“ v „*Příloze č. 2 programu Obnovitelné zdroje energie, Výzva V – VYMEZENÍ ZPŮSOBILÝCH VÝDAJŮ*“. [30]

Dotace 80 % způsobilých výdajů je tedy:

$$A_{dot} = ZV * 0,8 = 26\,206\,594 * 0,8 \quad (\text{Kč}) \quad (7.4)$$

$$\underline{\underline{A_{dot} = 20\,965\,275 \text{ Kč}}}$$

Kde A_{dot} je výše vypočtené dotace (Kč).

7.5 Výpočet provozní podpory – výkupní ceny

Dle cenového rozhodnutí ERÚ č.3/2019 uvedeného na (obrázku 21) je nutné stanovit redukční faktor (RF) o který bude podpora ponížena. Budu potřebovat dle uvedených vzorců stanovit IRR – vnitřní výnosové procento. Toto IRR jsem spočetl přes kalkulačku na webových stránce [33], kdy tento výpočet uvádím formou přílohy této práce. Hodnota úvěru v kalkulačce IRR – 16 316 725 Kč je rozdíl mezi hraničními investičními náklady (IN= 37 282 000 Kč) a možnou získanou dotací ($A_{dot} = 20\,965\,275$ Kč)

$$\underline{IRR = 11}$$

Dle následujícího vzorce spočítám anuitní faktor (AF)

$$AF = \frac{IRR}{1 - \frac{1}{(1+IRR)^{D\check{Z}}}} = \frac{11}{1 - \frac{1}{(1+11)^{30}}} \quad (-) \quad (7.5)$$

$$\underline{AF = 11}$$

Dále spočítám redukční faktor (RF)

$$RF = \frac{DOT * AF}{VYR} = \frac{20\,965\,275 * 11}{1257,3} \quad (K\check{c}) \quad (7.6)$$

$$\underline{RF = 183\,423\,K\check{c}}$$

Kde DOT je celková investiční dotace udělená projektu (Kč), VYR je množství vyrobené elektřiny (MWh).

Provozní podpora formou výkupních cen za vyrobenou elektrickou energii v MVE uvedených do provozu v nových lokalitách po 1.1.2016 je dle tabulky 10 pro rok 2020 stanovena na 2,741 Kč /kWh.

Navrhovaná MVE by měla vyrobit ročně 1.257.261 kWh elektrické energie. Podpora formou výkupních cen je tedy:

$$A_{pr.p.} = A_{vyk.c} * E_{skut} = 2,741 * 1\,257\,261 \quad (K\check{c}) \quad (7.7)$$

$$\underline{Apr.p. = 3\,446\,152\,K\check{c}}$$

Kde $Apr.p.$ je finanční příjem formou výkupních cen za dodanou elektrickou energii do sítě (Kč).

Celkovou provozní podporu, nebo-li celkový příjem za práci MVE spočítám dle vzorce:

$$A_{celk} = A_{pr.p} - RF = 3\,446\,152 - 183\,423 \quad (\text{Kč}) \quad (7.8)$$

$$\underline{A_{celk} = 3\,262\,729 \text{ Kč}}$$

7.6 Návratnost navrhované MVE

7.6.1 Návratnost v případě získání dotace

Předpokládanou prostou návratnost již se započtením dotace spočítám dle vzorce:

$$PN_{dot} = \frac{IN - A_{dot}}{A_{celk}} = \frac{37\,282\,000 - 20\,965\,275}{3\,262\,729} \quad (\text{rok}) \quad (7.9)$$

$$\underline{PN_{dot} = 5 \text{ let}}$$

Kde PN_{dot} je prostá návratnost se získáním dotace (rok).

Předpokládaná prostá návratnost je tedy max. 5 let, pakliže by tento návrh MVE získal aktuálně nabízenou dotaci z MPO – OP PIK.

Z pohledu ekonomické výhodnosti je tento návrh po získání dotace velmi zajímavým, jelikož v komerční sféře je návratnost 5 let velmi zajímavou investicí.

7.6.2 Návratnost bez dotačního financování

Předpokládanou prostou návratnost bez jakéhokoliv dotačního financování pouze s provozní podporou spočítám dle vzorce:

$$PN = \frac{IN}{A_{pr.p}} = \frac{37\,282\,000}{3\,446\,152} \quad (\text{rok}) \quad (7.9)$$

$$\underline{PN = 11 \text{ let}}$$

Kde PN je prostá návratnost bez dotačního financování (rok).

Opět při pohledu ekonomické výhodnosti je návratnost 11 let při předpokládané životnosti 30 let, stále zajímavá investice, kdy při nezapočítání jakýchkoliv nákladů (ať už servisních, osobních, finančních, apod.), a při dosavadní výši výkupních cen, se za dobu zbytkové předpokládané životnosti jedná o výnos na úrovni cca 65,5 mil. Kč.

8 Environmentální zhodnocení návrhu MVE

Použité zdroje [34, 35, 36, 37, 38, 39]

V kapitole 8.1 se pokusím nastínit jak nutnost vnímání ekologie při budování jakéhokoliv průmyslu včetně energetického, tak v kapitole 8.2 i úspory emisí, které vzniknou při výrobě elektrické energie z navrhované MVE a porovnáním s emisními faktory pro výrobu elektřiny v ČR.

8.1 Ekologie, energetika, ekonomika

Při hodnocení environmentálního přínosu výroby elektrické energie z vodní elektrárny a obecně z jakéhokoliv energetického (v současnosti využívaného) zdroje je nesporné se na předmětnou lokalitu podívat ze širšího zejména ekologického pohledu. U vodních energetických staveb zájem výroby elektřiny nemůže převládnout nad zájmem zachování přírodního bohatství dané lokalitou – mám namysli ochranu vody jako takové, její rozvedení v krajině a tím schopnost vsakování do spodních vod, ochrana vodní flóry a fauny mnoho dalších. Podrobněji v literatuře [35]. Je nutné hledat, porozumět a dojít k rozumnému, co nejvíce vyváženému optimu, pro uspokojení ekologického, energetického a ekonomického zájmu.

Lidstvo v minulosti dokázalo, že umí vnímat potřebu zachování přírodního bohatství, ale v posledních stoletích se obracíme spíše k technologiím a finančním hodnotám, a na přírodu příliš nehledíme.

Ekonomika nemůže být nadřazena nad ochranu přírody a krajiny a toto je nutné chápat, protože penězi se možná najíme v této době blahobytu, ale ne v době, kdy nebudeme mít kde zasadit a sklídit plodiny a pít čistou vodu. I planetu lze vyčerpat.

Získávání energie z obnovitelných zdrojů, mezi které vodní energie nesporně patří, má rozhodně smysl a je nutné tento způsob podporovat.

A slovy Václava Klause – „*Modrá, nikoliv zelená planeta*“, což dle mého názoru mimo jiné znamená, nutnost hledání právě toho vyváženého optima pro nás všechny, a tím zachování života lidské společnosti a životaschopné planety jako velmi komplikovaného ekosystému.

8.2 Porovnání úspory emisí MVE s emisními faktory pro elektřinu v ČR

Emisní faktory ČR jsou dle vyhlášky 480/2012 Sb. pro elektřinu jsou následující:

Látka	TZL	SO ₂	NO _x	CO	CO ₂
Emisní faktor celkem (kg/MWh)	0,0368	0,84124	0,56764	0,08621	1 011,60

Tabulka 12: Emisní faktory pro elektřinu

Celková vyrobená elektrická energie z tohoto návrhu MVE je 1 257,26 MWh. Při přepočtu je pak výsledná úspora vybraných škodlivin uvedena v tabulce 15.

Látka	TZL	SO ₂	NO _x	CO	CO ₂
Emisní faktor celkem (kg/MWh)	0,0368	0,84124	0,56764	0,08621	1 011,60
Vyrobená energie v MVE (MWh)	1 257,26				
Ušetřené škodliviny u MVE celkem (kg)	46,27	1 057,66	713,67	108,39	1 271 844,22

Tabulka 13: Předpokládaná úspora znečišťujících látek v kilogramech u MVE

Z porovnání úspory znečišťujících látek je vidět skutečná úspora, která se nemusí vypustit do životního prostředí naší kulturní krajiny. Samozřejmě v porovnání ve výkonu s velkými zdroji pro výrobu elektrické energie je výkon této MVE zanedbatelný a také více problematický v regulaci dodávek elektřiny.

Samostatnou prací je pak posouzení dalších rizik spojených s případným nedostatkem vody, jak je tomu v posledních letech.

9 Závěr

V této bakalářské práci jsem uvedl v její první části (kapitoly 1 a 2) zajímavou historii oblasti Šumavy z pohledu hydro-energetických děl. Uvádím zde 2 důležité plavební kanály, na nichž vznikly nejzajímavější hydrotechnická díla, na kterých mají zásadní vliv dva významní inženýři - Ing. Josef Rosenauer a Ing. Karel Kosek. Rovněž popisují první přečerpávací elektrárnu na našem území. V kapitole perspektiv dalšího rozvoje (kapitola 3) uvádím nejdůležitější legislativu k vodním hydroenergetickým dílům a popisují názor, že je stále značná kapacita pro budování MVE.

Ve druhé části práce (kapitoly 4 a 5) pak popisují rozdělení vodních děl podle koncepce řešení na vodním toku, podle spádu, podle způsobu provozu a podle instalovaného výkonu. Uvádím zde i dvě nejčastější konstrukce vodních elektráren – švédský a švýcarský

typ. V kapitole 5 se věnuji stavebním konstrukcím, strojním zařízením, převodům a elektrotechnickým zařízením vodních elektráren.

Ve třetí části (kapitola 6 až 8) se věnuji návrhu MVE dle univerzální charakteristiky, kdy navrhuji na zadané hydrologické parametry Kaplanovu turbínu s průměrem turbíny 0,907 m a instalovaným výkonem 266,3 kW.

V kapitole 7 se zabývám ekonomickou stránkou, a to jak provozní podporou, tak investiční podporou formou dotace z MPO. Uvádím zde jak metodiku výpočtu měrných investičních nákladů, tak i propočet uznatelných nákladů dle dotačního titulu OP PIK. Dále pak uvádím propočet provozní podpory v případě získání jakékoliv investiční podpory z veřejných prostředků a celkovou prostou návratnost v případě získání jak investiční tak provozní podpory, která však vychází na velmi zajímavých 5 let. Avšak dotační výzva k předkládání projektů má svůj časový rámeček.

Počítám zde i prostou návratnost bez dotačního financování a zde pak prostá doba návratnosti vychází na cca 11 let, což je z pohledu celkové předpokládané životnosti a při zachování výkupních cen stále velmi zajímavá investice.

V kapitole 8 se pak zabývám environmentálním zhodnocením návrhu, kdy nastíňuji osobní přístup pro hledání určitého optima mezi ekologií, energetikou a ekonomikou.

V tabulce 12 a 13 pak uvádím přehled emisí dle emisních faktorů, které jsou platné pro výrobu elektrické energie v ČR. Emisní faktory slouží pro stanovení množství škodlivin na jednotku vyrobené elektrické energie u tohoto návrhu MVE.

Přílohou této práce je pak obrázková galerie vztahující se zejména k popisovaným hydro-energetickým dílům z kapitol 1 a 2.

Poděkování

Rád bych zde také poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce, panu doc. Ing. Mojmíru Vrtkovi, Ph.D., za cenné rady, odbornou pomoc a celkové vedení, které mi pomohly ke zpracování mé bakalářské práce.

LITERATURA

- [1] ETTLER, Zdeněk, BĚL, Jiří, BARTÁK, Jiří: *Historie šumavských elektráren*. Přeštice, 1996
- [2] BĚL, Jiří, ETTLER, Zdeněk, BARTÁK, Jiří: *ŠUMAVSKÁ ENERGIE. O historii elektřině a přírodě*. Plzeň: Západočeská energetika, a.s., 2002. ISBN 80-23-90408-6
- [3] PECH, František Alexej: *První přečerpávací vodní elektrárna v Československu pod Černým jezerem*. Praha, 1938
- [4] KOPÁČEK, Tadeáš: *Vliv funkce hranic na dopravní propojení Jihočeského kraje a spolkové země Horní Rakousko*. [Online] 24.8.2015. Plzeň: ZČU, 2015. Dostupné: <https://docplayer.cz/17398254-Zapadoceska-univerzita-v-plzni-fakulta-ekonomicka.html>
- [5] BĚL, Jiří: *DVĚ VODNÍ DÍLA KARLA KOSEKA. VODNÍ ELEKTRÁRNY ČERNÉ JEZERO A VYDRA NA ŠUMAVĚ*. Plzeň: Západočeská energetika, a.s., 1998
- [6] Kolektiv autorů: *VYUŽITÍ DÍLA JOSEFA ROSENAUERA PRO ROZVOJ REGIONU ŠUMAVY*. Český Krumlov: Lesy České republiky s.p., 2004
- [7] ANDRESKA, Jan: *Technická díla staré Šumavy*. SANQUIS č. 64/2009, str. 126, [Online] 4.1.2020 Praha: 2009.
Dostupné: <https://www.sanquis.cz/index2.php?linkID=art2096>
- [8] Internetový zdroj: České hory, [Online] 5.1.2020
Dostupné: <https://antysl.ceskehory.cz/>
- [9] MELICHAR, Jan, VOJTEK, Jan, BLÁHA, Jaroslav: *Malé vodní turbíny: Konstrukce a provoz*. Praha: ČVUT, 1998. ISBN 80-01-01808-0
- [10] BEDNÁŘ, Josef: *Malé vodní elektrárny 2/ Turbíny*. Praha: SNTL, 1989
- [11] ŠTOLL, Čestmír: *Vyrovňovací nádrže špičkových elektráren*, Praha: Technický obzor 1948
- [12] Internetový zdroj: Asociace hydro-energetiků ČR [Online] 13.2.2020. Dostupné: <http://www.ahecr.cz/princip-rozdeleni-vodnich-elektren-v-cr>

- [13] Kolektiv autorů: *Typy vodních elektráren*. [Online] 6.1.2020 Ostrava: VŠB – TU Ostrava, 2013. Dostupné z: http://hgfl0.vsb.cz/546/VHZ3/typy_vodnich_elektraren.html
- [14] BOUŠKA, Jan, KNÍŽEK, Petr, KAŠPAR, Josef: *Sborník technických řešení malých vodních elektráren* Praha 31.10.2000, Svaz podnikatelů pro využití energetických zdrojů.
- [15] KUBÍK, František: *Elektrotechnická zařízení ve vodních elektrárnách*. Praha: Hydroprojekt, 1963
- [16] KRATOCHVÍL, Stanislav: *Využití vodní energie*. Praha: ČSAV, 1956
- [17] HOLATA, Miroslav: *Vtoky a jejich zaoblení*. Praha: ČVUT, 1970
- [18] Internetový zdroj: MVE Energetika, [Online] 11.1.2020
Dostupné: <http://mve.energetika.cz>
- [19] Internetový zdroj: Vodní energie [Online] 18.1.2020
Dostupné: https://biom.cz/upload/6e01d6d4c4835ec93cda508772f3bf6e/vodni_energie.pdf
- [20] VOŽENÍLEK, Petr, NOVOTNÝ, Vladimír, MINDL Pavel: *Elektromechanické měniče*. Praha: ČVUT 2011. ISBN: 978-80-01-04875-7
- [21] Internetový zdroj: Vodní energie [Online] 18.1.2020
Dostupné: https://biom.cz/upload/6e01d6d4c4835ec93cda508772f3bf6e/vodni_energie.pdf
- [22] Internetový zdroj: EnergyWeb [Online] 18.1.2020 Dostupné: https://www.energyweb.cz/web/index.php?display_page=2&subitem=1&ee_chapter=4.2.1
- [23] ŠTOLL, Čestmír, KRATOCHVÍL Stanislav, HOLATA Miroslav: *Využití vodní energie*, Praha: SNTL, 1977
- [24] HOLATA, Miroslav: *Malé vodní elektrárny*. Praha: Academia, 2002
- [25] HOLATA, Miroslav: *Hydraulika vodních motorů*. Praha: SNTL, 1967
- [26] NOVÁK, Jan: *Malá vodní elektrárna*. Brno: VUT, 2009
- [27] BEDNÁŘ, Josef: *Měření tekutinových systémů*. Brno: VUT, 1982
- [28] Internetový zdroj: VŠB – FEI, učební texty. [Online] 22.2.2020 Dostupné: http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/BC_FBI/Prednasky/Trafa_bc.pdf

- [29] Internetový zdroj: ABB, učební texty. [Online] 22.2.2020. Dostupné:
https://library.e.abb.com/public/066d995b512748758222c36763134a57/Presentation_PG%20Large%20Motors%20and%20Generators_CZ.pdf
- [30] Internetový zdroj: MPO, dotační program OP PIK. [Online] 22.2.2020. Dostupné:
<https://www.mpo.cz/cz/podnikani/dotace-a-podpora-podnikani/oppik-2014-2020/vyzvy-op-pik-2019/obnovitelne-zdroje-energie---v---vyzva--247990/>
- [31] Internetový zdroj: ERÚ, podporované zdroje energie. Citace [Online] 22.2.2020. Dostupné: <https://www.eru.cz/cs/poze>
- [32] Internetový zdroj: Zákony pro lidi. [Online] 23.2.2020. Dostupné:
<https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2015-296/zneni-20160101#p4-1-1>
- [33] CHADIM, Tomáš: *Finanční kalkulátor pro hodnocení ekonomické efektivnosti investic*. Praha: FEL ČVUT. Internetový zdroj: TZB - INFO. [Online] 07.3.2020. Dostupné:
<https://stavba.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/110-financni-kalkulator-pro-hodnoceni-ekonomicke-efektivnosti-investic>
- [34] KLAUS, Václav: *Modrá, nikoli zelená planeta*. Praha: Dokořán, 2007. ISBN: 978-80-7363-152-9
- [35] DUŠIČKA, Peter, GABRIEL, Pavel, HODÁK, Tomáš, ČIHÁK, František, ŠULEK, Peter: *Malé vodní elektrárny*. Bratislava: Jaga group, 2003. ISBN: 80-88905-45-1
- [36] Internetový zdroj: ČEZ a.s., *Energotrans a.s., Výroční zpráva 2018 - Bod 8.16 – Ochrana životního prostředí*. [Online] 23.2.2020. Dostupné:
https://www.cez.cz/edee/content/file/o-spolecnosti/dcerine-spolecnosti/dalsi-spolecnosti/energotrans_vz-2018.pdf
- [37] GABRIEL, Pavel, ČIHÁK, František, KALANDRA, Pavel: *Malé vodní elektrárny*. Praha: ČVUT, 1998. ISBN: 80-01-01812-1
- [38] Internetový zdroj: tzb-info.cz. [Online] 07.3.2020. Dostupné:
<https://vytapieni.tzb-info.cz/provoz-a-udrzba-vytapieni/17112-emise-co2-a-jejich-dopad-na-hodnoceni-zdroju-v-budovach>
- [39] Internetový zdroj: Zákony pro lidi. Příloha B. [Online] 08.3.2020. Dostupné:
<https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2012-480>

SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ:

Obrázek 1: Schwarzenberský plavební kanál – celková situace.

Obrázek 2: Portál tunelu pod Jelení horou – vstup.

Obrázek 3: Vchynicko – Tetovský plavební kanál.

Obrázek 4: Situace stavby přečerpávací elektrárny pod Černým jezerem.

Obrázek 5: Hotové tlačné potrubí.

Obrázek 6: MVE Vydra.

Obrázek 7: Situace a popis podzemního vedení potrubí z Mechova do MVE Vydra.

Obrázek 8: Rozvodna 110 kV v areálu MVE Vydra.

Obrázek 9: Strojní zařízení elektrárny Čeňkovy Pily.

Obrázek 10: 3 kV rozvodna elektrárny Čeňkova Pila.

Obrázek 11: Dřevěné vantroky Čeňkovy Pily.

Obrázek 12: Ing. Josef Rosenauer (vlevo) a Ing. Karel Kosek (vpravo).

Obrázek 13: MVE Čeňkova Pila.

Obrázek 14: Situace MVE v předmětné oblasti Šumavy.

Obrázek 15: Úhrn srážek v období 7/2009 až 6/2019.

Obrázek 16: Švédský typ.

Obrázek 17: Švýcarský typ.

Obrázek 18: Typy vyrovnávacích komor.

Obrázek 19: Oběžné kolo Kaplanovy turbíny. Vlevo zcela otevřeno, na středu polo-otevřeno a vpravo zcela uzavřeno.

Obrázek 20: Kaplanovy turbíny ČKD Blansko.

Obrázek 21: Výřez z cenového rozhodnutí ERÚ č.3/2019.

Obrázek 22: Příloha vyhlášky č. 296/2015 Sb.

Obrázek 23: Výpočtová tabulka IRR – vnitřního výnosového procenta.

SEZNAM POUŽITÝCH DIAGRAMŮ:

Diagram 1: Použitelnost jednotlivých typů turbín v závislosti na spádu H (m) a otáčkách turbíny n_s (ot.min^{-1}).

SEZNAM POUŽITÝCH GRAFŮ:

Graf 1: Přehled použitelnosti vodních turbín dle spádu a průtoku.

Graf 2: Dělení vodních elektráren podle instalovaného výkonu.

Graf 3: Odtoková křivka.

Graf 4: Hlavní univerzální charakteristika Kaplanovy turbíny ve veličinách $\eta = f(n, Q)$;

$D_0 = 1 \text{ m}$, $H_0 = 1 \text{ m}$, $\eta_0 = 85\%$.

Graf 5: Vývoj celkové účinnosti turbíny dle dnů z odtokové křivky.

Graf 6: Využitelná oblast odtokové křivky do 75 % účinnosti turbíny.

SEZNAM POUŽITÝCH TABULEK:

Tabulka 1: N – leté maximální průtoky.

Tabulka 2: M – denní průtoky.

Tabulka 3: Synchronní otáčky u třífázových generátorů spojených napřímo.

Tabulka 4: Přepočtové vztahy pro jednotlivé vodní čerpadla a turbíny.

Tabulka 5: Násobky provozních otáček udávající maximální průběžné otáčky.

Tabulka 6: Výpočty předpokládaného elektrického výkonu MVE.

Tabulka 7: Celková předpokládaná výroba elektrické energie z MVE.

Tabulka 8: Celková předpokládaná výroba elektrické energie včetně plánovaných odstávek.

Tabulka 9: Výše investiční nevratné podpory.

Tabulka 10: Výkupní ceny a zelené bonusy dle ERÚ pro rok 2020.

Tabulka 11: Hodnoty referenčního zdroje

Tabulka 12: Emisní faktory pro elektřinu

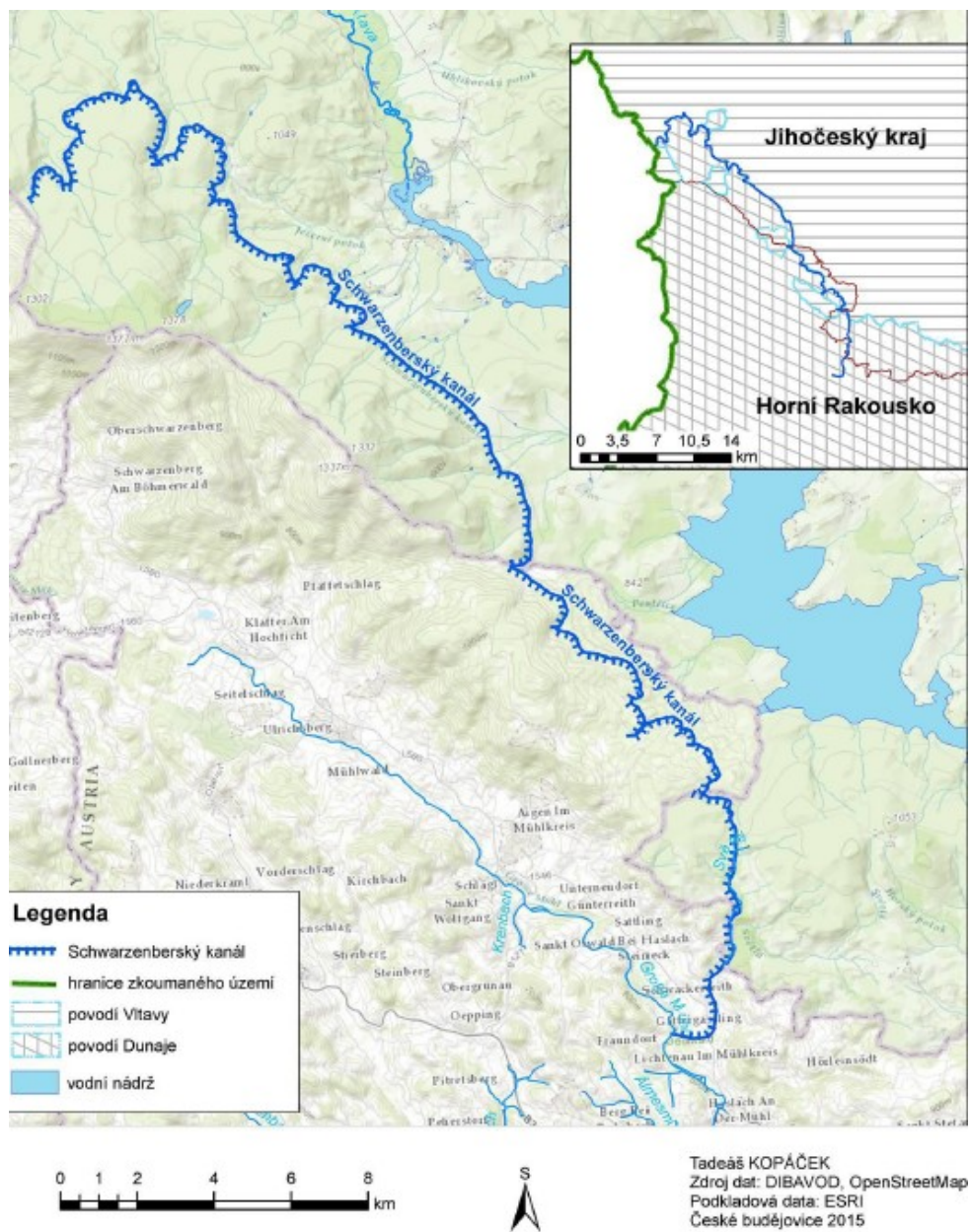
Tabulka 13: Předpokládaná úspora znečišťujících látek v kilogramech u MVE

SEZNAM PŘÍLOH:

Příloha 1: Fotografie, mapy, schémata k rešeršní části práce

Příloha 2: Výpočet IRR – vnitřního výnosového procenta

PŘÍLOHA 1 – Fotografie, mapy, schémata k rešeršní části práce



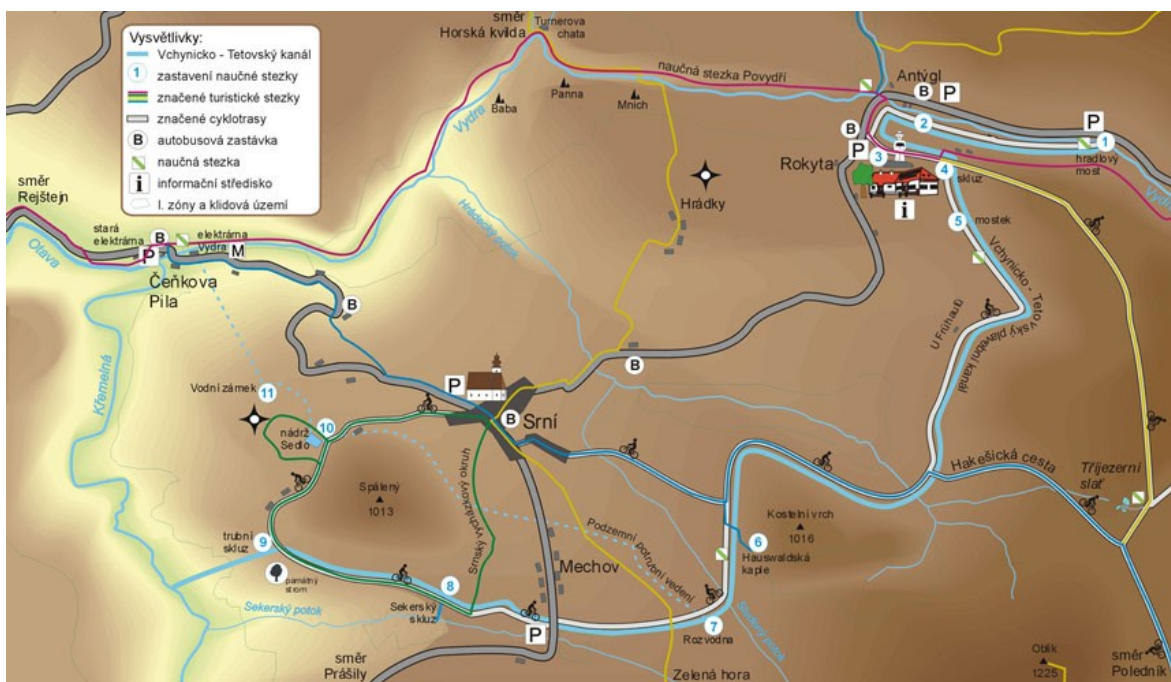
Obrázek 1: Schwarzenberský plavební kanál.

(Zdroj: KOPÁČEK, Tadeáš.)



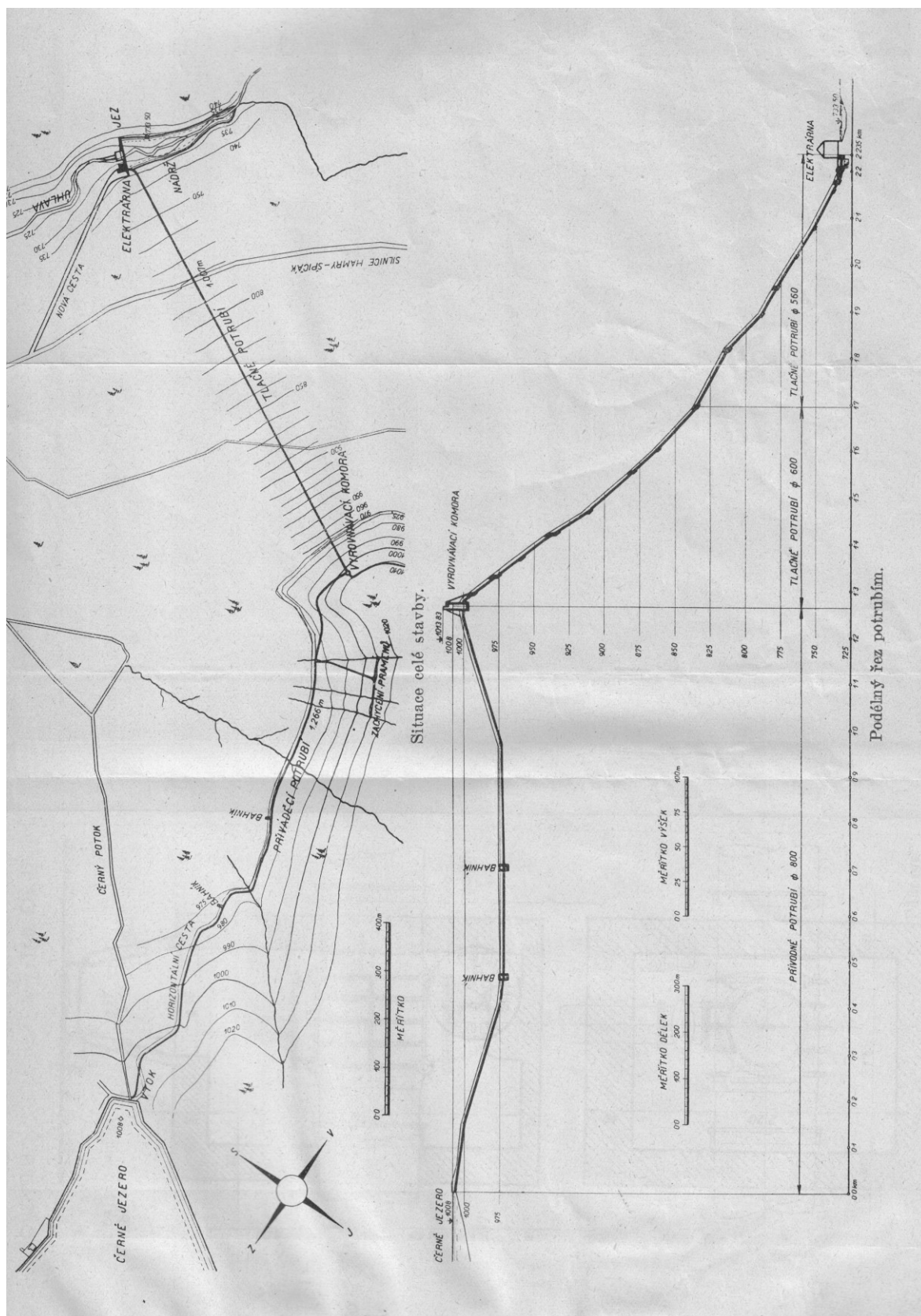
Obrázek 2: Portál tunelu pod Jelení horou.

(Zdroj: <https://www.turistika.cz/vylety/ns-schwarzenbersky-plavebni-kanal/detail>)



Obrázek 3: Vchynicko – Tetovský plavební kanál.

(Zdroj: http://www.npsumava.cz/image/npsumava/obr/ns_vtkmp.jpg)



Obrázek 4: Situace stavby přečerpávací elektrárny pod Černým jezerem.

(Zdroj: PECH, František Alexej)



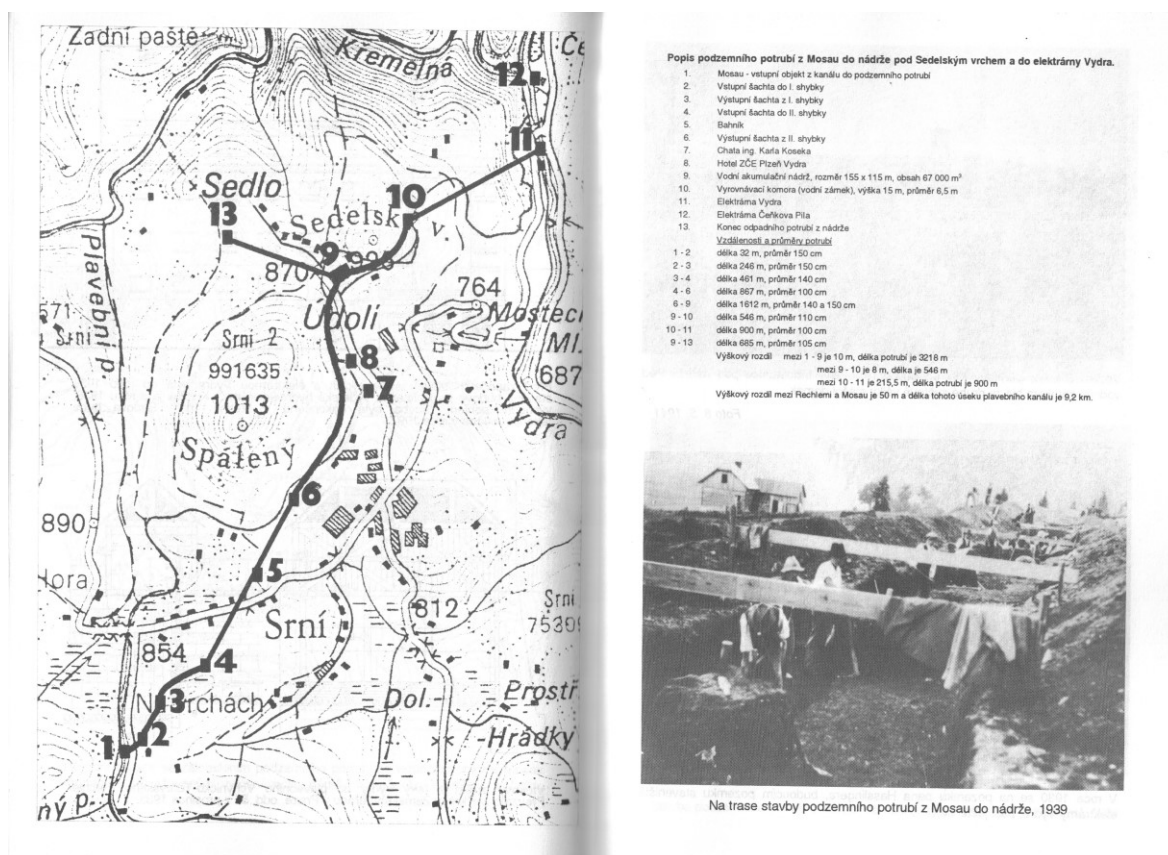
Obrázek 5: Hotové tlačné potrubí.

(Zdroj: PECH, František Alexej)



Obrázek 6: MVE Vydra.

(Zdroj: ETTLER, Zdeněk, BĚL, Jiří, BARTÁK, Jiří. Historie šumavských elektráren)



Obrázek 7: Situace a popis podzemního vedení potrubí z Mechova do MVE Vydra.
 (Zdroj: ETTLER, Zdeněk, BĚL, Jiří, BARTÁK, Jiří. Historie šumavských elektráren)



Obrázek 8: Rozvodna 110 kV v areálu MVE Vydra.

(Zdroj: autor)



Obrázek 9: Strojní zařízení Čeňkovy Pily.
(Zdroj: autor)

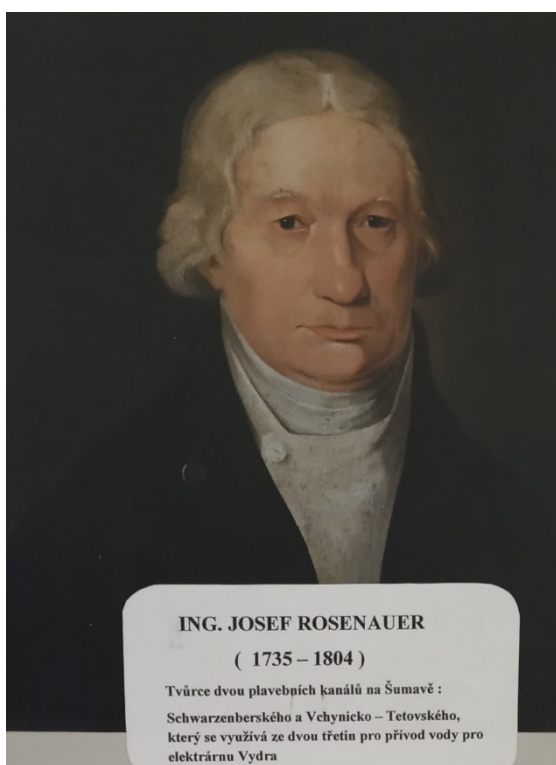


Obrázek 10: 3 kV rozvodna elektrárny Čeňkova Pila.
(Zdroj: autor)



Obrázek 11: Dřevěné vantroky Čenkovy Pily.

(Zdroj: autor)



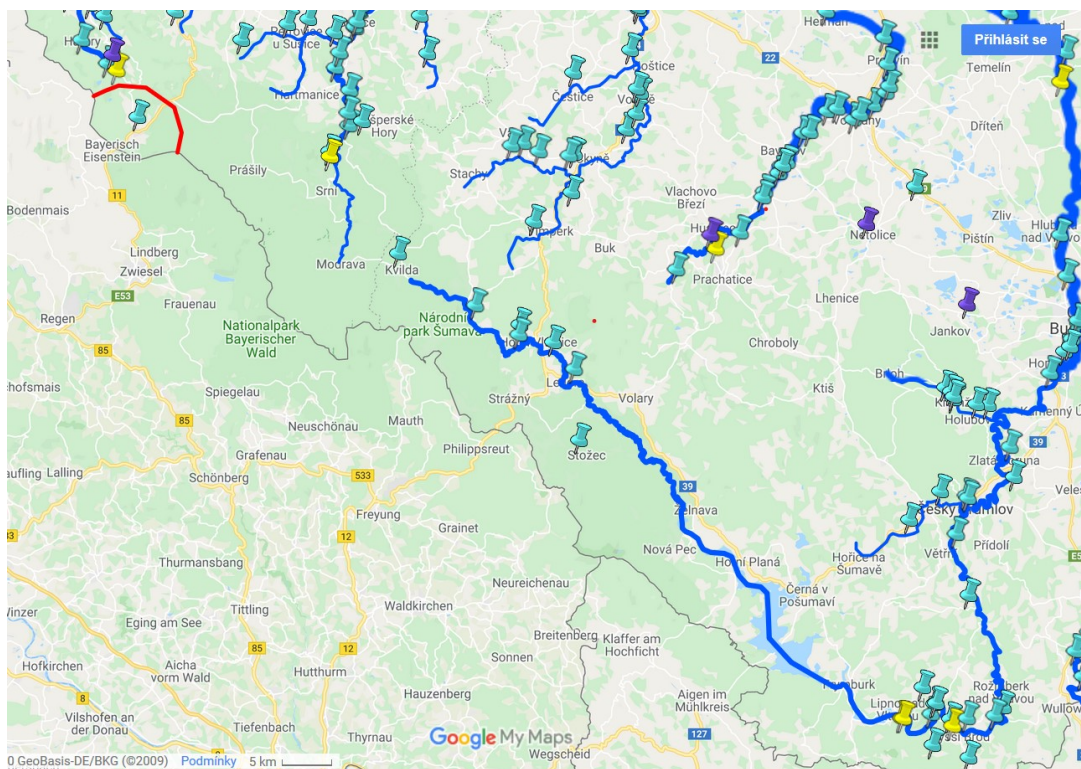
Obrázek 12: Ing. Josef Rosenauer (vlevo) a Ing. Karel Kosek (vpravo).

(Zdroj: autor)



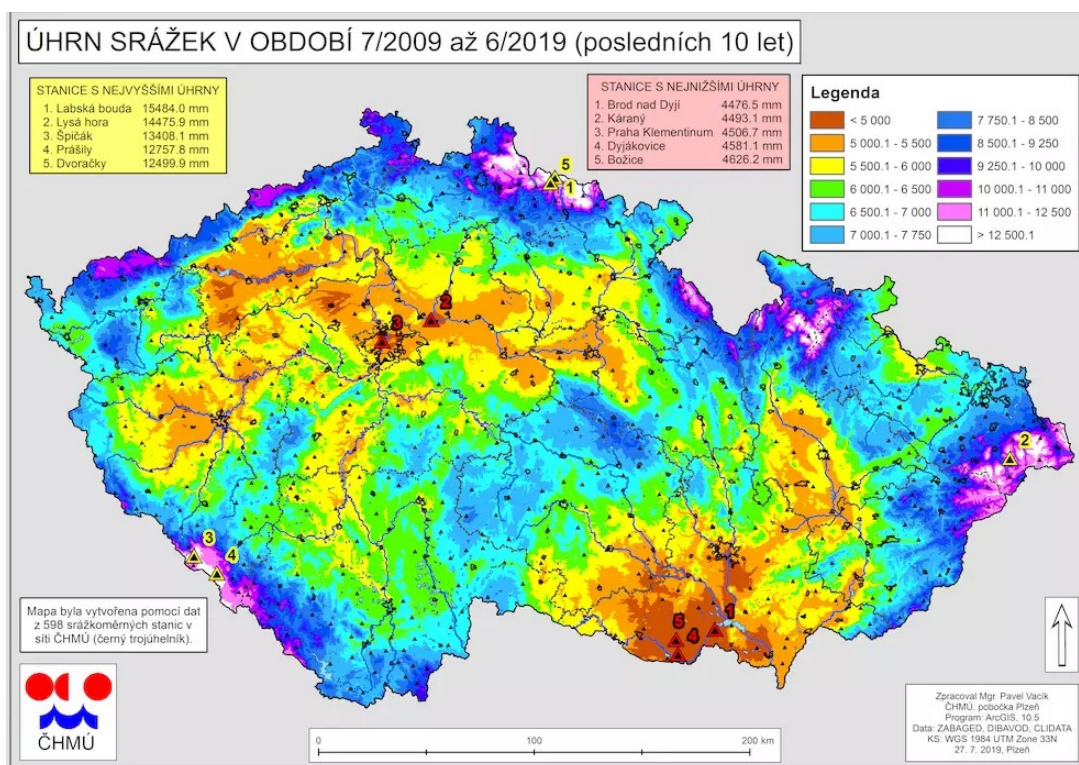
Obrázek 13: MVE Čeňkova Pila.

(Zdroj: <https://www.pamatkovykatalog.cz/vodni-elektrarna-cenkova-pila-16345700>)



Obrázek 14: Situace MVE v předmětné oblasti Šumavy.

(Zdroj: mapy Google prostřednictvím http://www.tv-adams.wz.cz/vodni_elektrarny_v_cr.html)



Obrázek 15: Úhrn srážek v období 7/2009 až 6/2019.

(Zdroj: ČHMÚ, zveřejněno dne: 29.7.2019)

PŘÍLOHA 2 – Výpočet IRR – vnitřního výnosového procenta [33]

Základní parametry investice			
Doba životnosti projektu	30	[počet let] ???	
Celková investice do zařízení	16316725	[Kč] ???	
Úvěr nutný pro pořízení zařízení ???			
Úvěr (vypůjčená částka)	16316725	[Kč]	
Úroková sazba	5	[%]	
Doba splácení úvěru	6	[počet let]	
Roční výnos z provozovaného zařízení ???			
Roční výnos z pořízovaného zařízení	3446152	[Kč]	
Roční změna výnosu z pořízovaného zařízení	0	[%]	
Roční náklady na provoz pořízovaného zařízení ???			
	Roční náklady [Kč]	Roční změna nákladů [%]	
č. 1	0	0	
č. 2	0	0	
Doplňkové parametry investice			
Diskont - výnos alternativní investice	3	% ???	
Bude se danit zisk z projektu? ???	<input checked="" type="radio"/> Ne	<input type="radio"/> Ano	
<div>VYPOČÍTAT</div>			
VÝSLEDKY			
NPV - čistá současná hodnota projektu:	33814839 Kč ???		
Roční ekvivalentní finanční toky investice:	1725208 Kč ???		
Doba návratnosti:	11 let ???		
Diskontovaná doba návratnosti:	12 let ???		
IRR - vnitřní výnosové procento investice:	11 % ???		

Obrázek 23: Výpočtová tabulka IRR – vnitřního výnosového procenta.
(Autor: Mgr. Tomáš Chadim, FEL ČVUT)